

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Návrh metodiky zkoušení kompozitních trubek určených pro sportovní pádla

Testing Methodology for Composite Tubes Used for Manufacturing of Paddles

Student:

Ing. Jana Sviželová

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student: **Ing. Jana Sviželová**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Návrh metodiky zkoušení kompozitních trubek určených pro sportovní
pádla
Testing Methodology for Composite Tubes Used for Manufacturing of
Paddles**
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte teoretický úvod do problematiky kompozitních materiálů a měření akustické emise.
2. S využitím dostupných informací proveďte teoretický silový rozbor veslařského pádla.
3. Na základě silové analýzy navrhnete zkušební přípravek pro trhací stroj TESTOMETRIC M500-50CT.
4. Navrhnete zkušební metodiku pro metodu akustické emise.

Seznam doporučené odborné literatury:

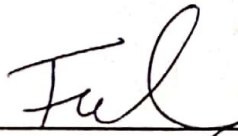
Ch. U. Grosse, M. Ohtsu, Acoustic Emission Testing, Springer Science & Business Media, 2008, ISBN: 3540699724
Z. Nazarchuk, V. Skalskyi, O. Serhiyenko, Acoustic Emission: Methodology and Application, Springer, 2017, ISBN: 3319493507
J. K. Burnett, Theory and Uses of Acoustic Emissions, Nova Science Publishers, 2011, ISBN: 1612099602
D.D.L. Chung, Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, 1994, ISBN: 9780750691451

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Michal Šofer, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Martin Fušek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

Pro účely měření v rámci práce byly využity vzorky materiálů dodaných firmou Havel Composites, s.r.o. Firma se zveřejněním výsledků souhlasí.

V Ostravě dne 18. května 2020.

Sviželová Jana

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, же - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.


.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Jana Sviželová

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jízdárna 357, 783 75 Dub nad Moravou

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Michalu Šoferovi, Ph.D. za odborné vedení, spolupráci při měření a vstřícný a přátelský přístup. Dík patří také konzultantovi této práce Ing. Richardu Moravcovi ze společnosti Havel Composites, s.r.o. za zprostředkování zkušebních vzorků a poskytnutí cenných rad při řešení této bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SVIŽELOVÁ, J. *Návrh metodiky zkoušení kompozitních trubek určených pro sportovní pádla*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 46 s. Vedoucí práce: Šofer, M.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem metodiky zkoušení kompozitních trubek určených pro výrobu sportovních pádel. Úvodní část práce je zaměřena na stručný literární rozbor problematiky kompozitních materiálů, metod zkoušení kompozitních materiálů, využití metod akustické emise a namáhání pádel. Na základě literárních poznatků byla navržena metodika testování kompozitních trubek, spočívající v aplikaci třibodového ohybu za současného snímání signálu akustické emise. Navržená metodika byla aplikována na vzorky trubek ze tří typů různých materiálů. Hodnocení výsledků je zaměřeno na porovnání vybraných vlastností trubek, potažmo materiálů, a identifikaci mechanismů poškození kompozitních materiálů.

Klíčová slova: kompozitní materiály; akustická emise; třibodový ohyb; kompozitní trubky; identifikace poškození

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SVIŽELOVÁ, J. *Testing Methodology for Composite Tubes Used for Manufacturing of Paddles*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava. Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics. 2020. 46 p. Thesis head: Šofer, M.

The presented bachelor thesis deals with the design of a methodology for testing composite tubes intended to produce sports paddles. The introductory part of the work focuses on brief literary analysis of composite materials, methods of testing composite materials, the use of acoustic emission methods and paddle stress. Based on the literature, a methodology for testing composite tubes was proposed, consisting in the application of three-point bending while recording the acoustic emission signal. The proposed methodology was applied to tube samples of three types of materials. The evaluation of the results focuses on the comparison of selected properties of tubes and materials and the identification of damage mechanisms of composite materials.

Key words: composite materials; acoustic emission; three-point bending; composite tubes; damage identification

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	2
1.1 Charakteristika a rozdělení kompozitních materiálů	2
1.2 Druhy matric v kompozitních materiálech	3
1.3 Druhy výztuží v kompozitních materiálech.....	3
1.3.1 Materiály výztuží	5
1.4 Metody zkoušení mechanických vlastností kompozitních materiálů	7
1.4.1 Tahová zkouška.....	7
1.4.2 Tlaková zkouška.....	8
1.4.3 Ohybová zkouška	9
1.4.4 Rovinná smyková zkouška.....	9
2 AKUSTICKÁ EMISE	10
2.1 Princip metody měření akustické emise	10
2.1.1 Zdroje akustické emise doprovázející porušení kompozitních materiálů	11
2.1.2 Událost akustické emise	12
2.1.3 Základní typy vln a mechanismus jejich šíření	12
2.1.4 Základní parametry signálu akustické emise	14
2.1.5 Lokalizace zdrojů akustické emise.....	15
3 Využití akustické emise při zkoušení vláknových kompozitních materiálů	16
3.1.1 Zpracování signálu akustické emise.....	16
3.1.2 Detekce typických mechanismů poškození vláknových kompozitních materiálů.....	17
3.1.3 Vliv orientace vyztužujících vláken na vznik poškození kompozitního materiálu.....	20
4 TEORETICKÝ SILOVÝ ROZBOR PÁDLA.....	23
5 SHRUTÍ LITERÁRNÍCH POZNATKŮ.....	25
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	27
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
7.1 Charakteristika zkušebních vzorků.....	28
7.2 Schéma měření	29
7.3 Měřicí aparatura.....	30
7.4 Analýza dat.....	31

7.4.1	Porušení vzorků.....	31
7.4.2	Hodnocení tuhosti trubek	32
7.4.3	Identifikace mechanismů porušení vzorků prostřednictvím akustické emise	33
8	Závěr.....	39
9	Literatura	41

ÚVOD

V mnoha průmyslových odvětvích se v dnešní době již upouští od použití tradičních materiálů. Tyto materiály bývají s výhodou nahrazeny materiály moderními, které se vyznačují výrazně lepšími mechanickými vlastnostmi. Do obsáhlé skupiny těchto materiálů lze zařadit také kompozity. I přesto že jsou kompozitní materiály v mnoha ohledech spolehlivější, stále může docházet k jejich poruchám. Proto je nutné detailně porozumět vztahu mezi namáháním a porušením struktury kompozitního materiálu. K tomuto účelu slouží různé zkoušky mechanických vlastností.

Při zkoušení kompozitních materiálů se často využívá metoda akustické emise, která se osvědčila jako výborný nástroj pro on-line monitorování porušení struktury. Prostřednictvím snímání akustické emise lze nejen detekovat právě probíhající porušení materiálu, ale také rozlišit jednotlivé typické mechanismy, které se v průběhu porušení uplatňují. Navíc umožňuje sledování defektů s citlivostí, které jiné metody téměř nedosahují. Díky těmto možnostem má široké spektrum využití od základního výzkumu mechanických vlastností zejména netradičních materiálů, přes kontrolu jakosti výrobků až po analýzu rozsáhlých konstrukcí.

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh metodiky zkoušení kompozitních trubek pro výrobu pádel s využitím metody akustické emise. V rámci práce bylo provedeno také zkoušení vzorků vybraných kompozitních materiálů prostřednictvím navržené metodiky a analýza naměřených dat s ohledem na identifikaci různých mechanismů poškození těchto vzorků. Realizace této práce probíhala ve spolupráci se společností Havel Composites s.r.o., která je výrobcem širokého spektra kompozitních materiálů a která poskytla zkušební vzorky pro účely měření.

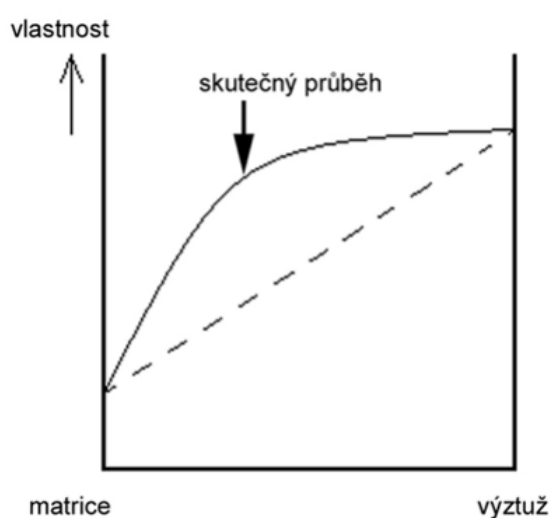
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály pochází již z raných zemědělských společností. Jejich oživení však přišlo až v první polovině 20. století, kdy se začaly využívat pro různá technická řešení. Používaly byly převážně pro jejich elektromagnetické vlastnosti. Začala se průmyslově vyrábět skleněná vlákna a lamináty s výztužemi z těchto vláken. V druhé polovině dvacátého století se však kompozitní materiály staly populárními v oblasti kosmického, leteckého a automobilového průmyslu. Pozornost se zaměřovala na výzkum a vývoj vylepšených materiálů. V poslední době je kladen důraz spíše na snižování nákladů na jejich výrobu a opětovné zavedení přírodních vláken (ekologické hledisko). [1, 2]

1.1 Charakteristika a rozdělení kompozitních materiálů

Jako kompozitní materiály se označují heterogenní materiály, skládající se ze dvou nebo více fází, které se výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. První z fází je obvykle spojitá, tzv. **matrice**, která plní funkci pojiva. Další fází je **výztuž**, která se ve srovnání s matricí obvykle vyznačuje výrazně lepšími mechanickými vlastnostmi (pevnost, tvrdost, modul pružnosti apod.). Hlavním cílem vyztužení, je tedy zlepšení uvedených vlastností materiálu. [3-6]

Kompozitní materiály se vyznačují tzv. **synergickým efektem** neboli kompozitním působením (viz. **Obr. 1**), které je příčinou špičkových vlastností těchto materiálů. Synergický efekt lze chápat jako spolupůsobení jednotlivých složek na určitou vlastnost kompozitního materiálu, která je však lepší než pouhý součet vlastností všech složek tohoto materiálu. Zásadní vliv na vlastnosti kompozitu má kvalita rozhraní mezi matricí a vlákny. Rozhraní brzdí šíření lomových trhlin, čímž se zvyšuje houževnatost materiálu. [3, 5]



Obr. 1: Schématické znázornění synergického efektu [3]

Kompozitní materiály lze klasifikovat dle celé škály parametrů. Základní členění, jež bude detailně rozebráno v následujícím textu, je založeno na typu výztuže a povaze matrice.

1.2 Druhy matic v kompozitních materiálech

Jak již bylo řečeno výše, matrice plní v kompozitních materiálech funkci pojiva. Kromě toho zabezpečuje také ochranu výztuže před okolními vlivy, zajišťuje přenos napětí na vlákna a zachování geometrického tvaru materiálu. V praxi jsou využívány tři základní typy matic:

- *kovové,*
- *polymerní,*
- *keramické.*

Kovové matrice se vyznačují dobrou tvařitelností, houževnatostí, teplotní a elektrickou vodivostí [3, 7]. Tyto matrice jsou zpravidla tvořeny lehkými kovy a jejich slitinami, jako je např. hliník, hořčík, titan, případně měď a stříbro pro elektrotechnické účely.

Polymerní matrice mají v praxi nejširší uplatnění. Jejich hlavní výhodou je nízká měrná hmotnost, díky čemuž se těší velké oblibě v leteckém průmyslu. Dále lze zmínit nízkou pořizovací cenu a dobrou zpracovatelnost. Jejich použití naopak omezuje nízká pevnost, nízký modul pružnosti a také úzký rozsah provozních teplot (0 až 260 °C) [8]. Materiály polymerních matic lze dále rozdělit na termoplasty a reaktoplasty (termosety). Mezi **termoplasty** se řadí např. polypropylen, polyamid a polyetylen. Zpracovávají se v tekutém stavu při teplotách nad 200 °C, za kterých dosahují potřebných vlastností [4]. Po ztuhnutí je možné termoplasty opětovně tavit, což je činí recyklovatelnými. Do skupiny **reaktoplastů** patří reaktivní pryskyřice jako např. polyesterové pryskyřice, vinylesterové pryskyřice, epoxidové pryskyřice, aj. V současnosti se jedná o nejrozšířenější materiály kompozitních matic. Pryskyřice se vyznačují širokým spektrem vlastností, závislých na obsahu různých přísad, např. vysokou houževnatostí, odolností proti únavě, chemickou a tepelnou odolností, nebo dobrou přilnavostí k vyztuzujícím vláknům. [3, 4]

Keramické matrice jsou nejčastěji tvořeny karbidem a oxidem křemíku, oxidem zirkonia nebo nitridem křemíku [9]. Keramické materiály pro výrobu kompozitů jsou lehké, velmi tvrdé a odolné proti vysoké teplotě, avšak nevýhodou je jejich vysoká křehkost [3]. Tuhé a křehké keramické matrice hůře přenášejí zatížení na vyztuzující vlákna. Používají se zpravidla pro jejich chemickou a tepelnou odolnost [10].

1.3 Druhy výztuží v kompozitních materiálech

Účelem výztuže v kompozitech je zvýšení pevnosti a tuhosti materiálu. Pro správnou funkci výztuže je důležité, aby vykazovala vyšší pevnost a tuhost než matrice [4]. Typy výztuže (viz **Obr. 2**) lze rozdělit na:

- *částicové,*
- *vláknové.*

U částicových výztuží jeden rozměr útvaru výrazně nepřevyšuje zbývající, jak je zřejmé z **Obr. 2**, přičemž částice výztuže mohou mít různý tvar (kulovitý,

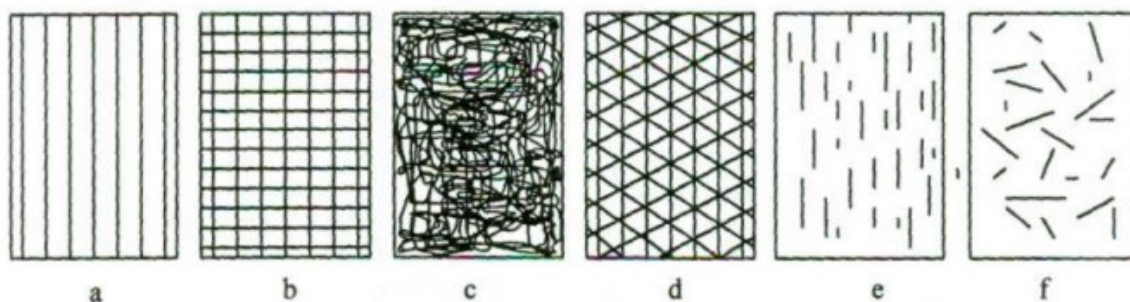
destičkový, tyčinkovitý apod.). **Částicové výztuže** se do matic přidávají pro zvýšení tuhosti a pevnosti v závislosti na jejich tvaru. Optimální velikost částic se pohybuje mezi 1 až 10 μm . Větší rozměr částic se nedoporučuje kvůli negativnímu ovlivnění pevnosti. U menších částic se obtížně dosahuje rovnoměrného rozptýlení. [3, 11]



Obr. 2: Typy výztuže kompozitních materiálů [11]

Vláknové kompozity se dále dělí na materiály s krátkými vlákny (délka je výrazně kratší než délka výrobku, $l/d < 100$) a dlouhými vlákny (délka srovnatelná s délkou výrobku, $l/d > 100$). Vyztužující vlákna se vyznačují vyšší pevností a tuhostí ve srovnání s maticí. Charakteristickou vlastností vláken je vyšší pevnost v tahu ve směru jejich osy než pevnost stejného kompaktního materiálu. Příčinou může být menší pravděpodobnost výskytu defektů ve vláknech, orientace defektů a pevných vazeb (např. polymerních řetězců) ve směru osy vláken. Z tohoto důvodu vlastnosti kompozitních materiálů výrazně převyšují pevnost běžných materiálů [3]. Vlákna se při vnějším namáhání deformují méně než matrice a dochází tak ke vzniku smykových napětí na rozhraní mezi vláknem a maticí. Napětí se tak přenáší z matrice na vlákna, která jsou schopna nést veškerá napětí působící na materiál a matrice je odlehčena. [3-5, 8]

Vlákna výztuže mohou být různě orientována, jak je naznačeno na **Obr. 3**. Kompozitní materiály jsou zpravidla skládány z elementárních vrstev. Vyztužující vlákna mají typicky lepší charakteristiky ve směru jejich osy. Orientací vláken tak lze ovlivnit míra anizotropie mechanických vlastností kompozitních materiálů. [11]



Obr. 3: Možnosti uspořádání vláknové výztuže a) jednosměrné b) tkanina c) rohož d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken e) krátká vlákna d) krátká vlákna s nahodilou orientací [11]

1.3.1 Materiály výztuží

Vlákna výztuže mohou být vyrobena z různých materiálů, které se liší svými vlastnostmi. V následujícím textu bude pozornost zaměřena na vlákna uhlíková, aramidová a skleněná.

Uhlíková vlákna mají díky svým vlastnostem nejširší spektrum uplatnění zejména pro velmi náročné aplikace. Jsou vyráběna z celulózy, polyakrilonitrilu (PAN) nebo smoly [9, 12] a obsahují do 92 % C. Běžný průměr uhlíkových vláken se pohybuje mezi 4 až 7 μm . Uhlíková vlákna jsou tvořena aromatickými vrstvami krystalů uhlíku, orientovanými ve směru osy vlákna. Paralelní uspořádání rovin je jedním z faktorů, kterými lze ovlivnit výsledné vlastnosti uhlíkových vláken. Díky uspořádání rovin se uhlíková vlákna vyznačují anizotropií vlastností. Například koeficient teplotní roztažnosti uhlíkových vláken je ve směru osy kladný a ve směru kolmo na osu záporný (podobně i tepelná a elektrická vodivost). Tato vlákna mají výborné mechanické vlastnosti. Pevnost uhlíkových vláken může dosahovat až několika GPa a modul pružnosti až 965 GPa. [13] Modul pružnosti navíc roste s rostoucím zatížením [12]. Mají nízkou měrnou hmotnost, jsou odolná proti dlouhodobému dynamickému namáhání a korozi. Uhlíková vlákna lze rozdělit podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti na tři typy [4, 9, 11, 12]:

- **Typ I** – HM (High Modulus) vlákna – vysokomodulová $E \leq 965 \text{ GPa}$, vyráběná karbonizací HS vláken při teplotách 2000 až 2800 $^{\circ}\text{C}$;
- **Typ II** – HS (High Strength) vlákna – vysokopevnostní $R_m \leq 7000 \text{ MPa}$, vyráběná při teplotách 900 až 1500 $^{\circ}\text{C}$;
- **Typ III** – IM (Intermediate Modulus) vlákna – mechanické vlastnosti leží mezi I a II typem

Skleněná vlákna jsou jednou z nejlevnějších alternativ kompozitní výztuže. Vyrábí se z taveniny směsi oxidů Si, Al, Ca, Mg, B s malým podílem oxidů alkalických kovů. Rozlišuje se několik typů skleněných vláken:

- E-sklo
 - bezalkalické; nejlevnější, výborné izolační vlastnosti a dobré mechanické vlastnosti;
- S-sklo
 - vyšší podíl oxidů Si, C, Al; vyšší teplota tavení, vyšší pevnost a modul pružnosti v tahu;
- C-sklo
 - odolnost vůči kyselinám a dalším chemickým látkám, méně pevná, neodolná vůči vyšší teplotě;
- Křemenná vlákna
 - dobré tepelně izolační vlastnosti, tepelná odolnost.

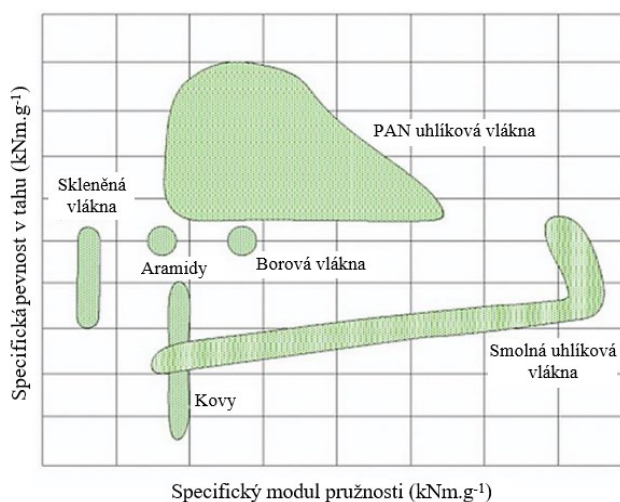
Technologie výroby skelných vláken se liší v závislosti na konečném použití. Nejčastěji se však vyrábí tažením roztavené skloviny přes spřádací trysky, které zajišťují její rovnoměrné vytékání a tuhnutí. Ihned po vyrobení je nutné každé vlákno opatřit ochranným

povlakem, kvůli snížení abraze mezi jednotlivými vlákny, která vede ke snížení jejich pevnosti. Díky nízké rychlosti krystalizace skloviny mají vlákna amfoterní strukturu a jsou izotropní. Běžně se vyrábí skleněná vlákna o průměru 7 až 15 μm . Skleněná vlákna jsou nehořlavá, nemagnetická, mají nízký součinitel teplotní roztažnosti. Výhodou jsou jejich nízké pořizovací náklady a nízké náklady spojené s údržbou. [4, 9, 11, 12]

Aramidová vlákna spadají do oblasti syntetických organických polymerů (aromatických polyamidů). Tato vlákna se vyznačují vynikajícími vlastnostmi – vysokou pevností, odolností proti vysokým teplotám, odolností vůči chemikáliím, nízkou měrnou hmotností apod. Aramidová vlákna vykazují silnou anizotropii mechanických vlastností, která je způsobena vysoce orientovanými řetězci molekul. Vzhledem k tomu, že ve směru osy vlákna nevykazuje materiál významné odchylky mechanických vlastností, může být považován za příčně izotropní. V podélném směru mají vlákna výrazně vyšší pevnost v tahu než v tlaku. Jsou špatně obrobitelná a jejich pevnost klesá při působení UV záření. I přesto jsou řazena mezi tzv. *High Performace Fibres*, tedy vlákna s vynikajícími vlastnostmi v oblasti pevnosti, tvrdosti, odolnosti proti vysokým teplotám a chemické odolnosti. [4, 12-16] Materiály pro výrobu aramidových vláken se dělí do dvou skupin:

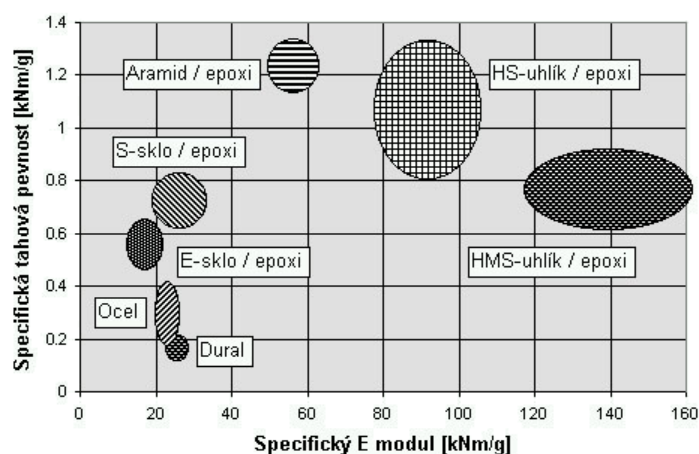
- Meta-aramidy (metafenylen-izoftalamidy) – vynikající termická odolnost a elektroizolační schopnost, např. Nomex.
- Para-aramidy (p-fenylen-tereftalamidy) – vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti, např. Kevlar, Twaron.
 - *Vysokomodulové* – letecké aplikace
 - *Nízkomodulové* – ochranné prostředky

Obr. 4 srovnává mechanické vlastnosti různých typů vláken. Jak je vidět, většina vláken vyrobených z výše zmíněných materiálů dosahuje mnohem lepších mechanických vlastností než kovové materiály. Tato vlákna se tak postupně stala důležitou součástí průmyslu a v mnoha aplikacích nahradila právě materiály kovové [16].



Obr. 4: Srovnání mechanických vlastností některých typů „High Performance“ vláken [16]

Kompozitní materiály však nelze posuzovat pouze podle mechanických vlastností samotných vláken. Jak bylo řečeno výše, kompozitní materiály se vyznačují tzv. synergickým efektem, který lze vysvětlit jako „spolupůsobení“ vlastností matrice a výztuže. Různé kombinace matic a výztuží tak mohou poskytovat různé kombinace mechanických vlastností, jak je vidět na **Obr. 5**.



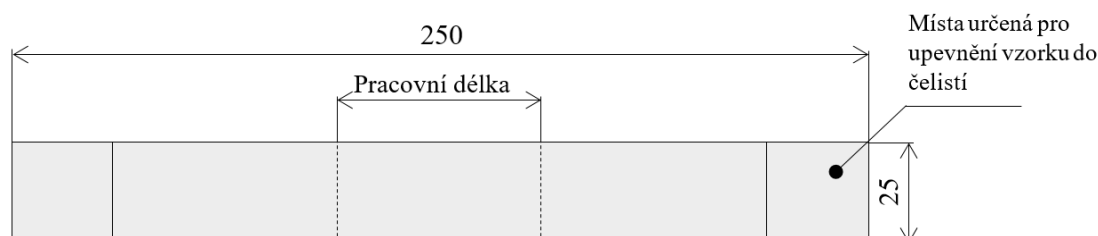
Obr. 5: Srovnání mechanických vlastností kompozitních materiálů [17]

1.4 Metody zkoušení mechanických vlastností kompozitních materiálů

Následující podkapitoly stručně uvádí metody zkoušení kompozitních materiálů. Účelem těchto metod je stanovení základních mechanických vlastností kompozitních materiálů, mezi které lze zařadit např. mez pevnosti a modul pružnosti při různých módech zatížení.

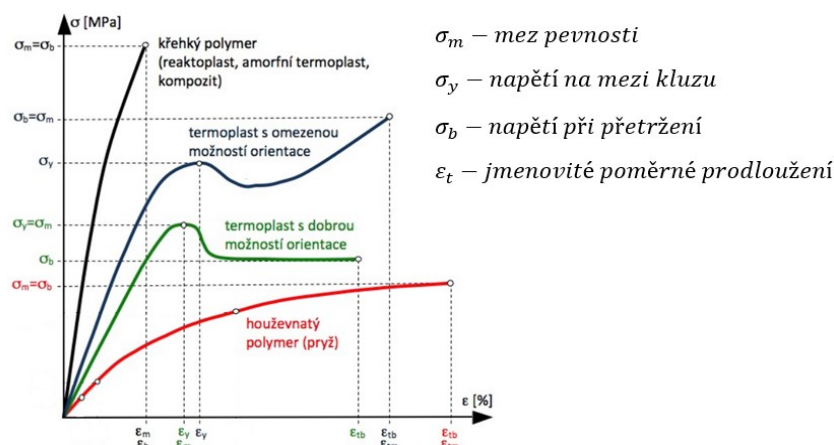
1.4.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška (ASTM D3039) měří velikost síly, která je potřebná pro přetržení vzorku kompozitního materiálu a protažení vzorku. Při tahové zkoušce se vzorky namáhají jednoosým tahem s konstantní rychlostí zatěžování. [4, 12, 18] Vzorky se umístí do úchyťů univerzálního zkušebního stroje a jsou zatěžovány až do přetržení. Typická zkušební rychlost pro standardní zkušební vzorky je $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro zkoušku tahem se běžně využívá vzorek s konstantním obdélníkovým průřezem a tloušťce 2 až 4 mm, jehož další rozměry jsou zobrazeny na **Obr. 6**.



Obr. 6: Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku [18]

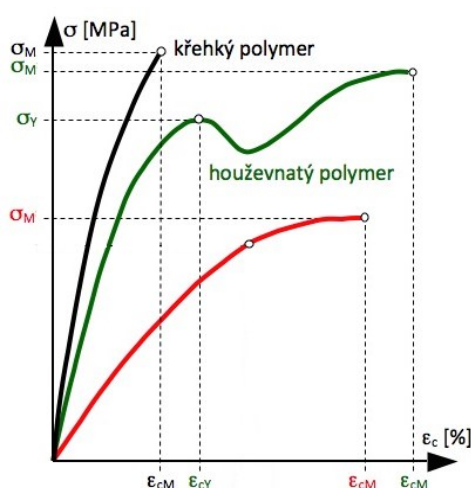
Výsledkem tahové zkoušky je diagram závislosti deformace na napětí, pomocí kterého se stanovuje **mez pevnosti materiálu**. Dalšími veličinami, které je možno stanovit na základě zkoušky tahem jsou **modul pružnosti v tahu**, **Poissonovo číslo** a **poměrné prodloužení** při přetržení. K určení prodloužení a modulu pružnosti v tahu je však potřeba ke zkušebnímu zařízení připojit extenzometr nebo tenzometr. [4, 12, 18]



Obr. 7: Typické deformační křivky některých kompozitních materiálů naměřené při zkoušce tahem [19]

1.4.2 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška má za cíl stanovení mechanických vlastností kompozitů s vysokým modulem pružnosti, při zatížení tlakem a relativně nízkých rychlostech namáhání nebo zatěžování. Z tlakové zkoušky lze zjistit **pevnost v tlaku**, **modul pružnosti v tlaku**, **mez kluzu a deformaci** při napětí odpovídajícímu mezi kluzu. K určení modulu pružnosti je opět nutné připojit extenzometr. Tento způsob zkoušení je vhodný pro kompozitní materiály s modulem pružnosti až do 41,37 GPa. [20, 21]

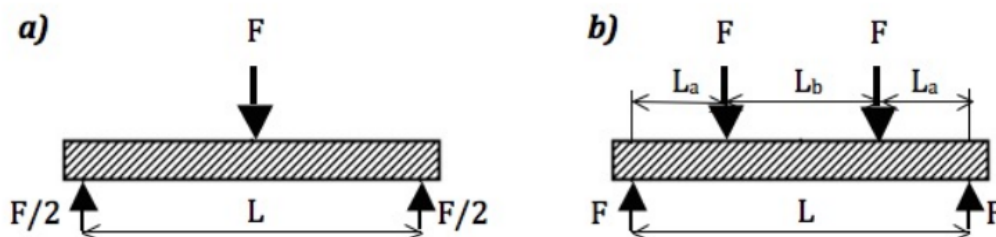


Obr. 8: Typické deformační křivky kompozitních materiálů naměřené při zkoušce tlakem [19]

Tlaková zkouška se provádí na zkušebních vzorcích tvaru kvádrů o rozměrech 12,7x12,7x25,4 mm nebo válce o délce 25,4 mm a průměru 12,7 mm. Vzorek se umístí mezi tlačné desky rovnoběžně s povrchem a je stlačován rovnoměrnou rychlostí. Standardní rychlost zatěžování je $1,3 \pm 0,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Výsledkem zkoušky je diagram závislosti poměrného stlačení na napětí. Ukázka deformačních křivek v tlaku polymerních kompozitů s různou houževnatostí je zobrazena na **Obr. 8**. [20, 21]

1.4.3 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška měří sílu potřebnou k ohnutí vzorku za určitých podmínek zatížení. Ohybová zkouška má dvě varianty – zkouška *tříbodového ohybu* (ASTM D790-15) a zkouška *čtyřbodového ohybu* (ASTM D6272-10). Zkouška čtyřbodového ohybu se využívá u materiálů, které se neporuší za podmínek tříbodového ohybu [21]. Schémata zatěžování v průběhu těchto zkoušek jsou pro představu zobrazena na **Obr. 9**. V průběhu ohybových zkoušek se testuje **ohybová pevnost materiálu** a **modul pružnosti v ohybu**. [12]



Obr. 9: Schéma zatěžování ohybem a) tříbodovým b) čtyřbodovým [19]

Při ohybové zkoušce vzorek leží na podporách s určitou roztečí a je na něj aplikováno zatížení stanovenou rychlostí. Mezi parametry zkoušky patří rozteč podpor, rychlost zatížení a maximální průhyb. Tyto parametry se řídí tloušťkou zkušební vzorku. Rychlost zatížení u materiálů, které podléhají menším výchylkám je $0,01 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a u materiálů podléhajících velkým výchylkám $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. [12, 21] Zkouška tříbodového ohybu končí, jakmile se vzorek zlomí, nebo dosáhne 5 % vychýlení. Zkouška se většinou provádí na plochých vzorcích o rozměrech $125 \times 12,7 \times 3,2 \text{ mm}$. [12, 21]

1.4.4 Rovinná smyková zkouška

Rovinná smyková zkouška (ASTM D3518) slouží ke stanovení smykových vlastností vrstvených laminátů. Zkouška se vztahuje na materiály obsahující vysokomodulovou výztuž v podobě vrstev, s vlákny orientovanými symetricky pod úhlem $\pm 45^\circ$ k hlavní ose vzorku. Na zkušební vzorek se aplikuje jednosměrná tahová síla za podmínek zkoušky tahem (ASTM D3039). Zkušební vzorky se umístí do úchytů univerzálního testeru v určené vzdálenosti od úchopu a jsou zatěžovány až do porušení. Typická zkušební rychlost pro standardní zkušební vzorky je $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Rozměry zkušební vzorku se shodují s tahovou zkouškou (viz **Obr. 6**). Výsledkem zkoušky je **pevnost ve smyku** a **modul pružnosti ve smyku**. [22]

2 AKUSTICKÁ EMISE

Akustická emise je pojem, jenž označuje fyzikální jev, při kterém dochází ke vzniku elastických napět'ových vln v důsledku uvolnění mechanického napětí v materiálu. [6, 23, 24]. Akustická emise tedy znamená generování elastické vlny v důsledku prudké změny napět'ového stavu. Tato změna je obvykle způsobena aplikací vnějšího podnětu, působícího na materiál. Změna napětí musí být dostatečně rychlá. Energie vzniklá při uvolnění mechanického pnutí, která není spotřebována na určitý proces (např. deformační) probíhající v materiálu, je vyzářena ve formě elastických vln v pásmu frekvencí 50 kHz až 1 MHz [25, 26]. Tohoto jevu se využívá při detekci strukturálních změn v materiálech, jako jsou např. šíření trhliny, plastická deformace či fázové změny [23, 27].

Materiál, ve kterém lze detekovat akustickou emisi může být pevný, kapalný, plynný nebo plazma. Vnější napětí lze aplikovat mechanicky, tepelně, magneticky apod. Akustické vlny jsou jednou ze dvou neelektromagnetických mechanismů přenosu energie skrz materiál. Druhým mechanismem je tepelná difúze. Tepelná difúze zahrnuje přímý přenos energie mezi jednotlivými atomy, zatímco akustická vlna přenáší energii kooperativním pohybem mnoha atomů. [24]

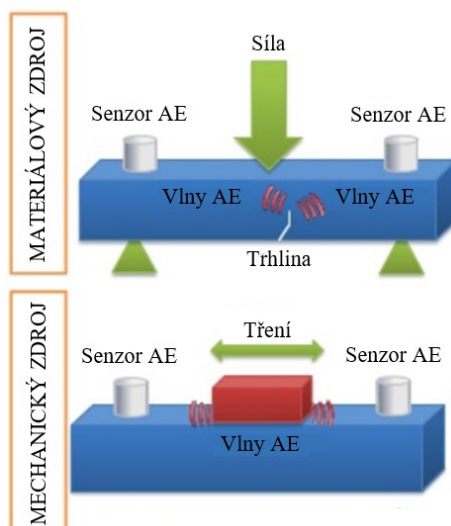
Nedestruktivní metoda testování materiálů, součástí a konstrukčních celků, která je založena na uvedeném principu se shodně nazývá **akustická emise (AE)**. Stručnému popisu této metody a stěžejních dílčích dějů se věnují následující podkapitoly.

2.1 Princip metody měření akustické emise

Jak bylo uvedeno výše, akustická emise je metoda založená na detekci elastických napět'ových vln. Tyto vlny jsou generovány výskytem dynamických procesů v materiálu. Signály akustické emise se projevují jako postupné elastické vlnění, šířící se materiálem [6, 28, 29]. Metodu zkoušení materiálu pomocí akustické emise lze rozdělit do několika fází:

1. Událost zdroje akustické emise.
2. Šíření napět'ových vln – akustická emise od zdroje.
3. Detekce napět'ových vln snímačem akustické emise na povrchu tělesa a transformace na elektrický signál.
4. Analogové zpracování elektrického signálu.
5. Vyhodnocení elektrického signálu měřícím systémem.

Detekce elastických vln je v základním principu relativně jednoduchá. Vlny emitované mechanickým nebo materiálovým zdrojem dosahují povrchu měřeného vzorku a produkují malé posuvy. Tyto posuvy jsou následně zachyceny snímačem a převedeny na elektrický signál (viz Obr. 10). [27]



Obr. 10: Princip měření akustické emise [30]

2.1.1 Zdroje akustické emise doprovázející porušení kompozitních materiálů

Jak bylo řečeno výše, kompozit je materiál složený z vlákna a výztuže, které vykazují odlišné mechanické vlastnosti. Vlákna mají většinou vyšší pevnost, nízkou schopnost plastické deformace a nesou veškerá napětí působící na materiál. Iniclace porušení je proto většinou vázána na výztuž. Zdrojové mechanismy v kompozitních materiálech zahrnují praskání matrice, delaminaci a odloupenutí vláken od matrice, lom vláken a šíření trhlin. Všechny tyto zdrojové mechanismy mohou být aktivovány působením vnějšího napětí. Na základě myšlenky, že amplituda akustické emise souvisí s objemem zdroje, praskání matrice by mělo produkovat emisi s nejnižší amplitudou, následovanou oddělováním matrice od vláken. Praskání vláken by mělo produkovat emisi s vyšší amplitudou, částečně kvůli množství energie uvolněné lomem vlákna s vysokou pevností. Emise o nejvyšší amplitudě by měla poté vznikat při šíření trhliny, které zahrnuje všechny předchozí mechanismy. [23, 24] Tohoto schématu se však kompozitní materiály nemusí striktně držet, neboť jsou mnohdy vyráběny ručně, což může být příčinou nepravidelností ve struktuře [24].

První zatížení kompozitního materiálu vytvoří signál akustické emise již při zatížení výrazně pod mezí pevnosti konstrukce. Nejpravděpodobnější zdroj této emise je uvolnění malých zbytkových napětí během prvního zatížení, která se vyvíjela v lokálních oblastech, při procesu vytvrzování. Pouze zřídka je tato emise detekovatelná i při druhém a následném zatížení. [24]

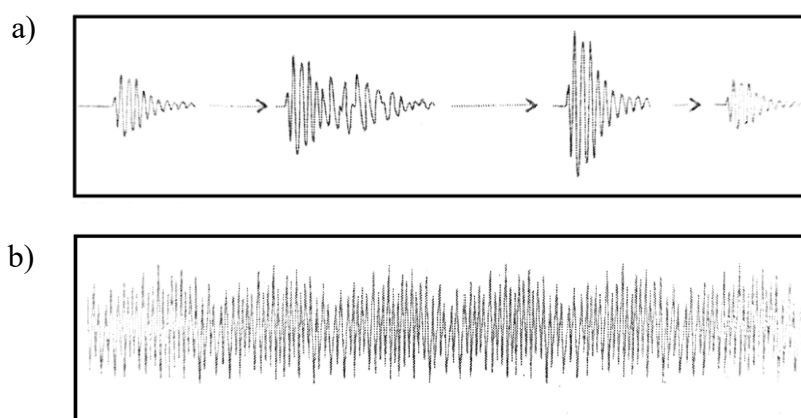
Další zdroje emisí v kompozitních materiálech jsou často vidět během cyklického zatížení. Tato emise se objevuje ve středních rozsazích cyklického zatížení, kdy je rychlost změny aplikovaného napětí nejvyšší. Tento jev je pravděpodobně způsoben třením mezi malými oblastmi struktury, které nejsou spojeny. Tento typ emise může být přítomen během celé zkoušky cyklickým zatížením. Nebude ovšem korelovat se strukturálním poškozením v testovaném objektu, které je spojeno s emisemi vyskytujícími se v blízkosti špičky zatížení, zejména při jeho růstu. [24]

2.1.2 Událost akustické emise

Událost akustické emise je reprezentována dynamickým rázem, který iniciuje akustickou emisi. Detekcí rázové vlny akustické emise vzniká tzv. **hit signálu akustické emise**. [23]

Pokud dochází ke vzniku událostí akustické emise v určitých časových prodlevách, jedná se o nespojitou, neboli **praskavou akustickou emisi** (burst). V takovém případě vznikají události akustické emise s dostatečným časovým odstupem po doznění předchozí události. Signál praskavé akustické emise se vyznačuje oddělenými, rozlišitelnými hity. Tento signál, typický např. pro šířící se trhlinu, je pro představu uveden na **Obr. 11a**. [23]

Existují procesy, jejichž vlivem vzniká mnoho událostí akustické emise současně. Vlny jednotlivých událostí akustické emise, šířící se materiálem, se překrývají a sčítají a vzniká akustický šum, který představuje **spojitou akustickou emisi**. Příklad spojitěho akustického signálu je uveden na **Obr. 11b**. [23] Spojitý signál akustické emise je typický např. pro plastickou deformaci, únik média či netěsnosti potrubí.



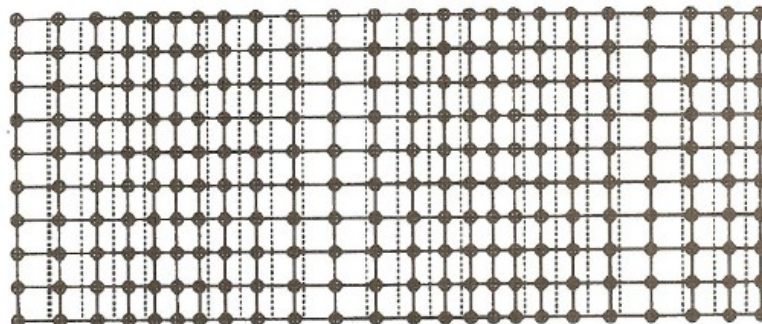
Obr. 11: Příklady signálů akustické emise a) praskavá b) spojitá [23]

2.1.3 Základní typy vln a mechanismus jejich šíření

Akustickou emisi představují akustické vlny generované materiálem, obvykle v reakci na změnu napětí. Jakmile jsou tyto vlny generovány, šíří se materiálem ve formě kulových vlnoploch. Pohyb akustické vlny je kooperativní pohyb atomů v materiálu šířený přes jejich obrovské množství. Tento kolektivní pohyb naznačuje, že vlnová délka je ve srovnání s meziatomovou vzdáleností dlouhá. Vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci vlny. Proto se u akustické vlny obvykle předpokládá, že má relativně nízkou frekvenci. [23, 24]

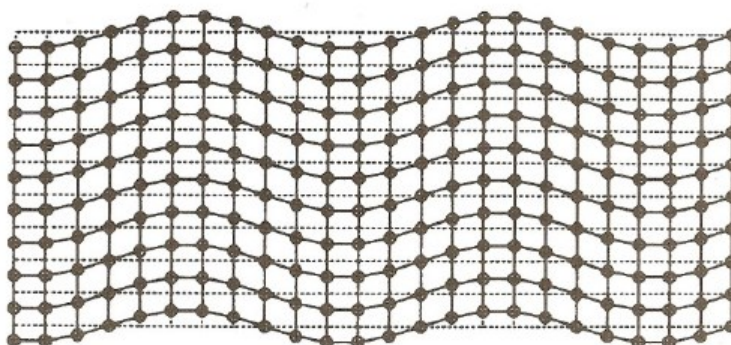
Podle způsobu kmitání atomů se rozlišují dva základní módy šíření objemových vln. Prvním typem akustické vlny je **kompresní vlna** (podélná vlna, viz **Obr. 12**), vznikající, pokud je materiál v okolí kritické oblasti náhle stlačen poruchou, která v něm probíhá. Tato komprese může být buď pozitivní, nebo negativní. V materiálu kritické oblasti dochází ke změně hustoty, která postupně přechází do dalších vrstev materiálu. Rychlost šíření vlny určuje pevnost meziatomárních vazeb a hustota materiálu. Výsledná vlna je známa jako kompresní vlna a vyskytuje se ve všech materiálech, pevných látkách, kapalinách, plynech

a plazmatech. Průměrný pohyb atomů v kompresní vlně je rovnoběžný se směrem jejího šíření. [23, 24]



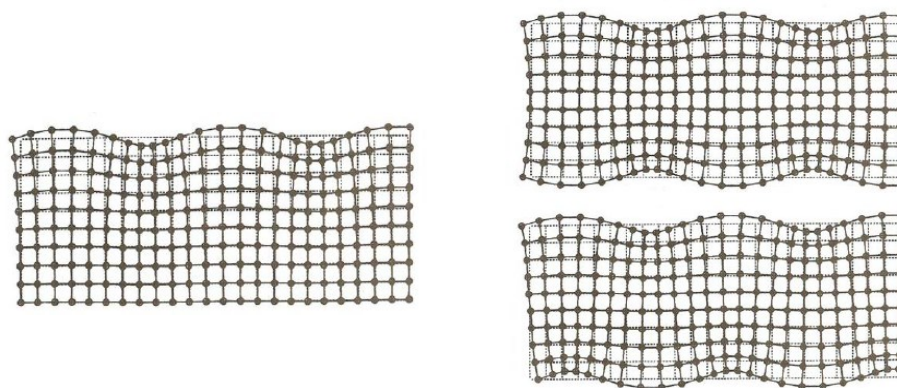
Obr. 12: Podélná vlna [24]

S rostoucí tuhostí materiálu se meziatomární síly stávají komplexnějšími a jsou závislé na geometrické poloze atomů. V takovém případě je přípustných více režimů šíření vlny a průměrný pohyb atomů již nemusí být paralelní se směrem šíření vlny. Objevuje se druhý typ objemových vln – vlny **příčné** (viz **Obr. 13**). Příčná vlna se od podélné liší směrem kmitání částic, který je kolmý na směr šíření vlny. Na rozdíl od podélných vln se příčné vlny mohou šířit pouze v prostředí, které je schopné přenášet smykové síly, tedy pouze v pevných látkách. Rychlost příčné vlny je vždy menší než rychlost šíření podélné vlny. [24, 31]



Obr. 13: Příčná vlna [24]

Další komplikaci představují hranice materiálů, kdy může v důsledku změny hustoty docházet k odrazům, lomům, nebo dalším změnám způsobu šíření vlny. Například anizotropie vazebných sil atomů na povrchu materiálu je příčinou vzniku dalších typů vln – **vln povrchových**. [23, 24, 32] Povrchová vlna má maximální amplitudu na povrchu a směrem od povrchu se zmenšuje. Rovina pohybu částic může být rovnoběžná nebo kolmá s povrchem. Protože však většina snímačů akustické emise detekuje pouze pohyb kolmý k povrchu, je rovnoběžná vlna detekována jen zřídka. **Rayleighova vlna** (**Obr. 14a**) představuje typ vlny, který se šíří povrchem materiálu a zasahuje do hloubky zhruba jedné vlnové délky. Pokud je těleso ohraničeno dvěma povrchy (např. deska) a jeho tloušťka je řádově rovna několika vlnovým délkám, může docházet ke vzniku Lambových vln. **Lambova vlna** je v podstatě tvořena dvěma povrchovými vlnami synchronizovanými buď symetricky (**Obr. 134** nahoře), nebo asymetricky (**Obr. 14b** dole). [23, 24, 32]



a) Rayleighova vlna

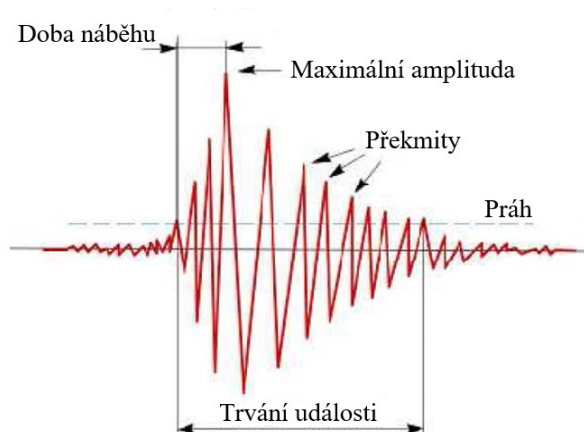
b) Lambovy vlny

Obr. 14: Typy povrchových vln [24]

2.1.4 Základní parametry signálu akustické emise

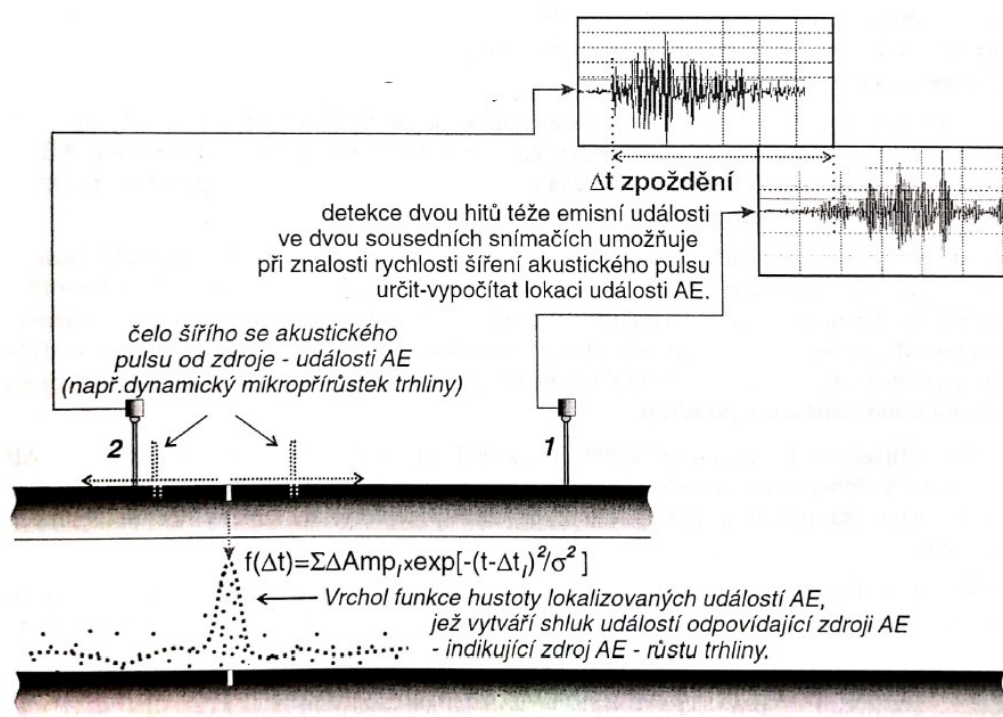
K vyhodnocení signálu akustické emise se využívá řada parametrů. **Obr. 15** zobrazuje teoretický signál akustické emise se znázorněnými stěžejními parametry, využívanými k popisu signálu [6, 24, 32]:

- Práh – nastavená hodnota, při jejímž překročení je detekován signál akustické emise;
- Čas příchodu – čas prvního překročení prahu signálem;
- Doba náběhu signálu – čas mezi prvním překročením prahu a dosažením maximální amplitudy emisní události;
- Počet překmitů do maxima – počet překmitů do dosažení maximální amplitudy signálu, udává strmost náběhu signálu;
- Maximální amplituda hitu emisní události;
- Počet překmitů – počet překmitů přes nastavenou hodnotu (práh);
- Délka emisní události – čas mezi prvním a posledním překročením prahu emisní události.

**Obr. 15:** Teoretický signál akustické emise [6, 32]

2.1.5 Lokalizace zdrojů akustické emise

Princip lineární lokalizace zdrojů akustické emise je zobrazen na **Obr. 16**. Uvažujme materiál se zdrojem akustické emise (např. šířící se trhlinou), na kterém jsou umístěny dva snímače. Od zdroje se šíří vlny akustické emise směrem k oběma snímačům. Při konstantní rychlosti vln signál nejprve doputuje ke snímači č. 2 a s určitým časovým zpožděním Δt i ke snímači č. 1. Pokud je známa rychlost šíření vln v daném materiálu, je možné vypočítat polohu zdroje události akustické emise. Pokud je poloha událostí v závislosti např. na amplitudě hitů vynesena do grafu, objeví se v místě zdroje shluk lokalizovaných událostí. Podobný princip lze aplikovat také na ploše, v prostoru atd. [23, 24]



Obr. 16: Princip lineární lokalizace zdrojů akustické emise [23]

3 Využití akustické emise při zkoušení vláknových kompozitních materiálů

Všechny poruchy vznikající uvnitř materiálu produkují vlny typické pro konkrétní typ poruchy. Tyto vlny poskytují cenná data vypovídající o akumulaci poškození během procesu vzniku poruchy materiálu. Tato skutečnost je využívána k identifikaci a klasifikaci poškození, vznikajícího v průběhu mechanických a provozních zkoušek. Inicie a průběh poškození kompozitních materiálů má komplexní mechanismus, kterému je obtížné porozumět. Odezva vláknových kompozitů na napětí je převážně lineární a jednoduše predikovatelná, ovšem při vývoji poškození mezi jednotlivými vrstvami kompozitních materiálů je situace komplikovanější [33].

S rychlým vývojem nedestruktivního testování bylo vyvinuto mnoho pokročilých technik monitorujících průběh poškození materiálů. Jedna z metod sloužící ke klasifikaci poškození je **metoda akustické emise**, která je v této oblasti považována za velmi slibnou [33]. Metoda akustické emise disponuje velkou výhodou, neboť monitoruje vnitřní poškození struktury materiálu v reálném čase a má dostatečnou citlivost i pro detekci mikroskopických poškození [34]. Metoda má tak dobrý potenciál pro charakteristiku mechanismů poruch v laminovaných kompozitních materiálech. Jeden z obtížných problémů při použití této metody však může být stanovení dobré korelace mezi mechanismy výskytu poruch a výsledných vlastností akustické emise.

Následující kapitoly jsou zaměřeny na rozbor současné literatury z oblasti zkoušení kompozitních materiálů s využitím metody akustické emise. Pozornost je věnována zejména možnostem detekce typických stádií poškození kompozitních materiálů pomocí vybraných parametrů akustické emise. Pro úplnost je literární rozbor doplněn také základními informacemi o zpracování signálu akustické emise.

3.1.1 Zpracování signálu akustické emise

Mnoho výzkumů se již věnovalo studiu vztahů mezi parametry signálu akustické emise a charakteristikami poškození [29, 33-40]. Bylo zjištěno, že každý mechanismus poškození má specifický rozsah parametrů signálu akustické emise, jako je frekvence či amplituda. Přístupy založené na deskriptoru¹ akustické emise se však často zaměřují na časové znaky, které nejsou zcela použitelné pro charakteristiku komplexních kompozitních materiálů [36]. K překonání tohoto problému bývá aplikována časově frekvenční analýza pro klasifikaci mechanismů porušení. Účelem časově-frekvenční analýzy je popsat změnu spektra signálu akustické emise v časové oblasti a vytvořit matematický model tak, aby energie a distribuce signálu mohly být vyjádřeny současně v časové a frekvenční doméně. Poté lze popsat pravidlo změny signálu a lze najít specifickou vlastnost nebo podobnost. Základní metoda časově-frekvenční analýzy je založena na *Fourierově transformaci*, která aproximuje signál jako kombinaci sinusových nebo kosinových signálů v různých frekvenčních doménách [35]. Fourierova transformace má však určitá omezení při popisu nelineárních

¹Diagnostický ukazatel pro určení poruchy, např. střední hodnota, složka frekvenčního spektra [42]

a nestacionárních signálů [41]. Tato omezení kompenzuje např. *Hilbert-Huangova transformace*, která pracuje na základě empirického rozkladu. Signál je rozložen na tzv. funkce vnitřního režimu (Intrinsic Mode Functions – IMF), které jsou dále transformovány *Hilbertovou transformací*, čímž se získá energetické spektrum v časové a frekvenční rovině [35, 43]. Dále se využívají metody *Vlnkové transformace*, což je soubor metod, které taktéž poskytují informaci o časové i frekvenční doméně signálu a kompenzují tak nevýhody Fourierovy transformace [34, 39, 44].

Oblasti transformovaného signálu, odpovídající jednotlivým typům poškození se určí prostřednictvím **klastrování**. Jedná se o identifikaci podskupin v datech tak, že datové body ve stejné skupině jsou velmi podobné, zatímco datové body v různých klastrech jsou naopak velmi odlišné [24, 45]. V současné literatuře lze nalézt aplikaci různých technik klastrování. Například autoři studií [33, 38, 46-48] využili neověřený *K-means algoritmus* pro klastrování parametrů signálu odpovídajících odlišným mechanismům porušení. Tato metoda dělí datové body do několika nepřekrývajících se skupin, přičemž každý bod patří pouze do jedné skupiny [45]. Jako další příklad může sloužit modifikace *K-means algoritmu*, tzv. *Fuzzy C-means algoritmus*, který umožňuje jednomu datovému bodu v určité míře náležet do každého definovaného klastru [49]. *Fuzzy C-means* klastrování bylo využito např. v literatuře [34, 50].

3.1.2 Detekce typických mechanismů poškození vláknových kompozitních materiálů

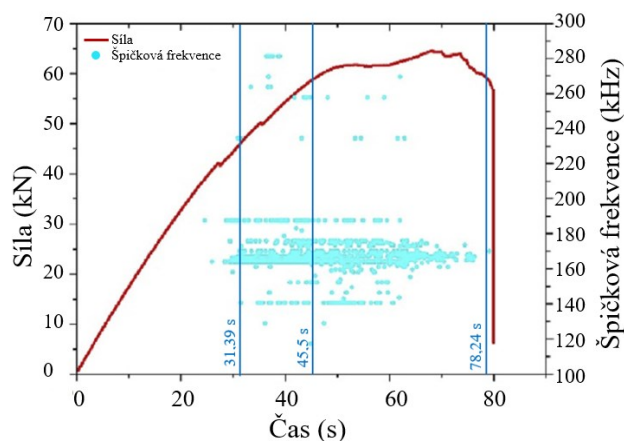
Akustická emise má dobrý potenciál charakterizovat mechanismy poruch v laminovaných kompozitních materiálech. V současnosti existuje řada výzkumů zaměřených na využití akustické emise při detekci poškození kompozitů [29, 31-40, 42, 46-48, 50, 51]. Jeden z obtížných problémů při použití této metody však může být stanovení dobré korelace mezi mechanismy porušení materiálu a výslednými vlastnosti akustické emise [36]. Různé fáze poškození se mohou projevovat typickými událostmi akustické emise, zahrnujícími řadu parametrů, mezi které patří např. amplituda, počet překmitů, doba trvání události apod. [34].

Autoři studií [29, 33-39] úspěšně klasifikovali stádia poškození vláknových kompozitních materiálů na základě frekvence signálu. U kompozitních materiálů dochází ke třem základním typům poškození, kterým odpovídá také určitý rozsah frekvencí. Nejnižší je frekvence porušení matrice následovaná frekvencí procesu oddělování vláken od matrice. Nejvyšší amplitudou se poté vyznačuje poškození vláken výztuže. [34, 35] Např. v rámci studie [34], byly zjištěny konkrétní hodnoty frekvence (viz. **Tabulka I**), odpovídající uvedeným typům poškození kompozitních materiálů.

Tabulka I Frekvence odpovídající jednotlivým stádiím poškození [34]

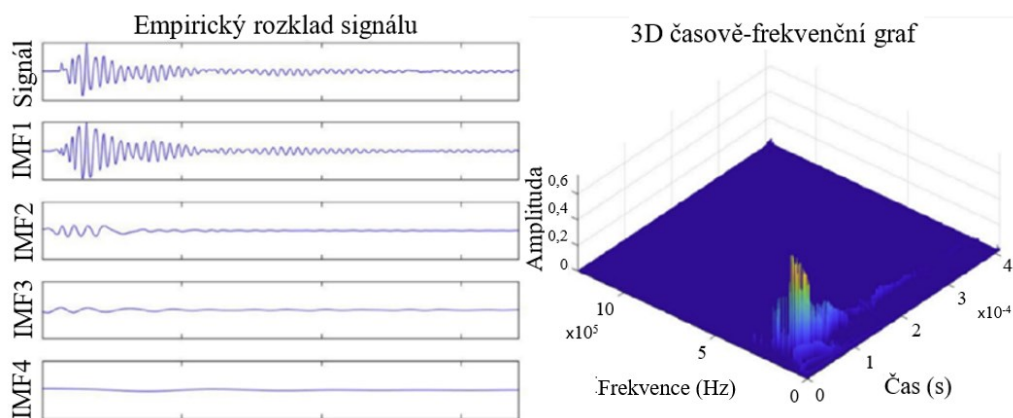
Stádium poškození	Frekvence (kHz)
Poškození matrice	90–180
Oddělování vláken od matrice	180–300
Poškození vláken	> 300

Protože při zatěžování materiálu vzniká mnoho módů zatížení, je často obtížné rozlišit typy poškození z naměřeného překrývajícího se signálu. Např. v práci [35] byla proto použita metoda HHT k extrakci charakteristických signálů poškození kompozitních trubek, naměřených v průběhu tahového zatížení. Analyzovány poté byly časově-frekvenční charakteristiky signálu v různých fázích zatížení. **Obr. 17** zobrazuje průběh zatěžující síly v čase a výskyt špičkových frekvencí událostí akustické emise v průběhu zatěžování.



Obr. 17: Průběh zatěžující síly a naměřené frekvence signálu akustické emise [35]

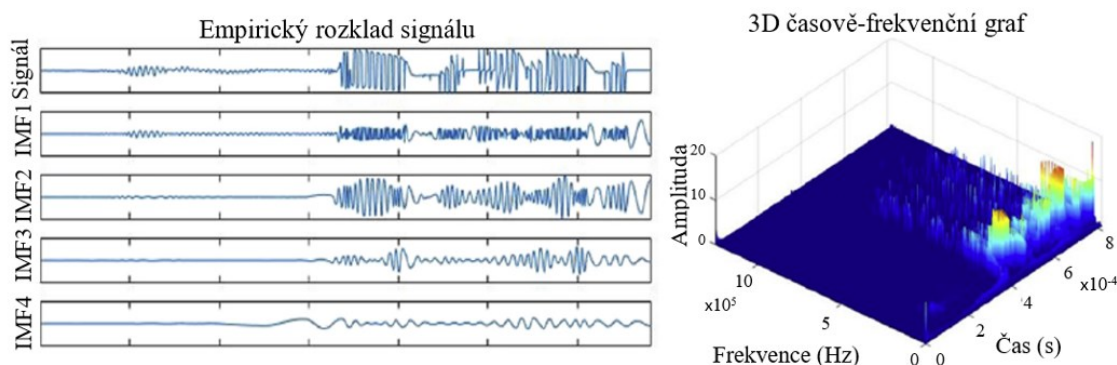
Obr. 18 zobrazuje signál naměřený v první fázi zatěžování vzorku (31,39 s, viz. **Obr. 17**), transformovaný do časové roviny a dekomponovaný prostřednictvím metody HHT. Frekvence signálu se pohybovala v rozmezí 40 až 165 kHz. Signál byl dále rozložen do 4 funkcí vnitřního režimu, které jsou na **Obr. 18** seřazeny dle frekvence od nejvyšší po nejnižší. Signál IMF1 byl podobný původnímu signálu. Koncentrace energie v 3D časově-frekvenčním grafu ukazuje, že mechanismus poškození byl v tomto čase relativně osamělý. To značí, že první docházelo k poškození matrice [35].



Obr. 18: Transformovaný a dekomponovaný signál akustické emise v první fázi zatěžování vzorku (v čase 31,39 s) [35]

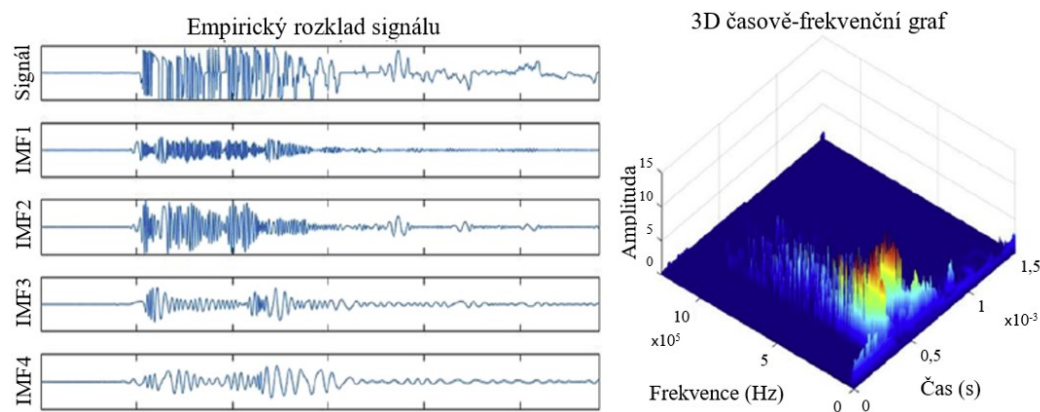
Na **Obr. 19** je analyzován signál naměřený v druhé fázi zatížení (45,5 s, viz. **Obr. 17**). Frekvence signálu ležela převážně v oblasti mezi 60 a 500 kHz. 3D časově-frekvenční graf ukazuje, že Hilbertovo spektrum bylo kontinuální. Lokální maximum spektra značilo,

že došlo k vysokofrekvenčnímu poškození vzorku. Byla detekována také složka signálu, jejíž frekvence ležela mezi 27 až 153 kHz, což bylo podobné první fázi zatěžování a pravděpodobně se jednalo o stejný typ poškození. V druhé fázi, zatěžování vláken často vyústilo v deformaci vláken se současným oddělováním vláken od matrice s jejím rozsáhlým poškozením. [35]



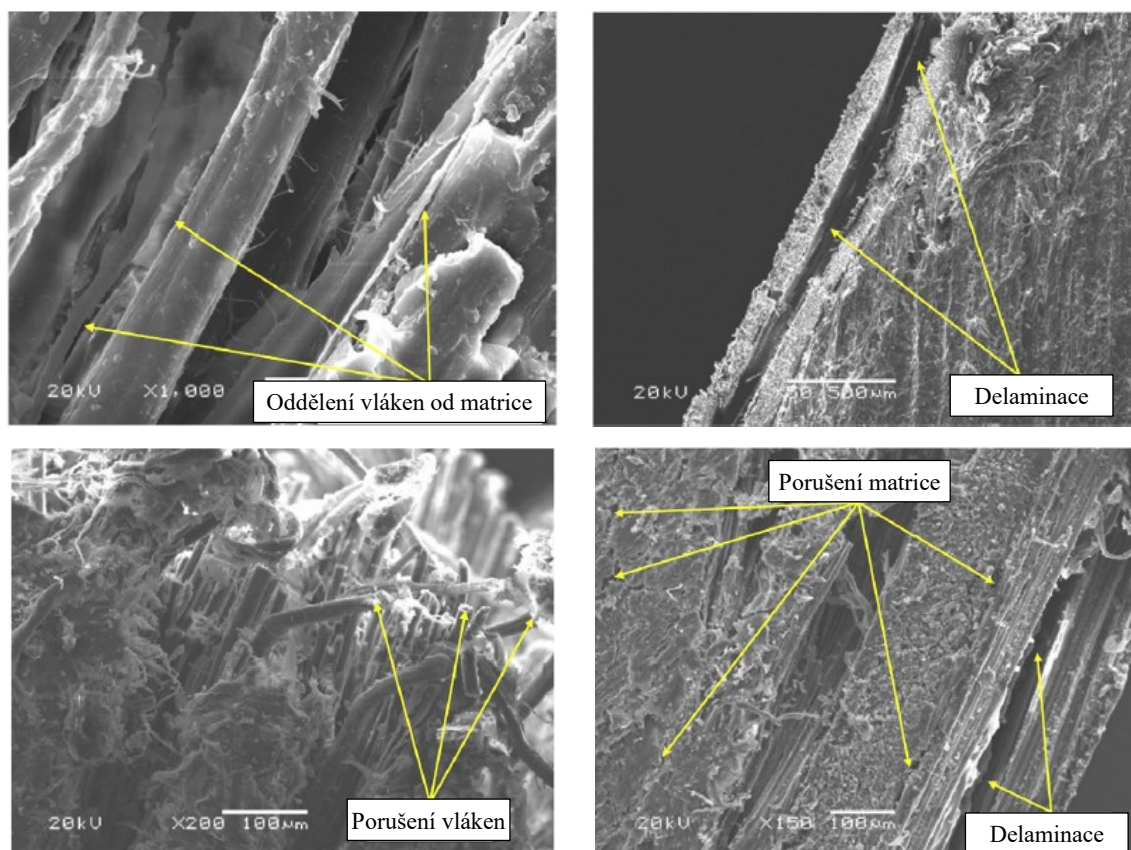
Obr. 19: Transformovaný a dekomponovaný signál akustické emise v druhé fázi zatěžování vzorku (v čase 45,5 s) [35]

Obr. 20 zobrazuje signál třetí fáze zatížení (78,24 s, viz **Obr. 17**) po HHT. V této fázi tahového zatížení byl detekován signál s rozsáhlým spektrem frekvencí, přičemž dominantní byl signál nízkofrekvenčního poškození s několika oblastmi s vyšší frekvencí. Oblasti s vyšší frekvencí mohou značit oddělování vláken od matrice a nejvyšší frekvence poškození vláken. [35] Zjištěné rozsahy frekvencí zhruba odpovídají hodnotám, uvedeným v **Tabulce I**.



Obr. 20: Transformovaný a dekomponovaný signál akustické emise ve třetí fázi zatěžování vzorku (v čase 78,24 s) [35]

Obr. 21 pro lepší představu demonstruje snímky jednotlivých stádií porušení vláknového kompozitního materiálu, pořízené skenovacím elektronovým mikroskopem [38].



Obr. 21: Snímky typických stádií porušení kompozitního materiálu [38]

3.1.3 Vliv orientace vyztužujících vláken na vznik poškození kompozitního materiálu

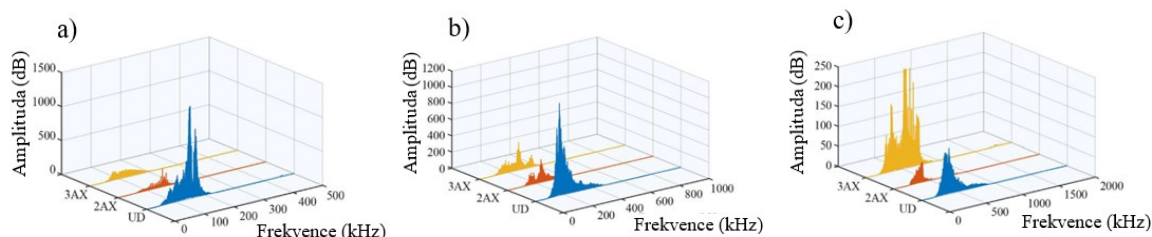
V současnosti existuje spousta typů vrstvených kompozitů, lišících se např. materiály matric a výztuže, tvarem výztuže či způsobem výroby, a tedy i řada možností, jak tyto kompozity optimalizovat s cílem zvýšit jejich mechanické vlastnosti. Bylo zjištěno, že jedním z velmi důležitých parametrů je orientace výztuže v jednotlivých vrstvách materiálu [34, 40, 51-53].

Na detekci poškození kompozitních vzorků s ohledem na orientaci vyztužujících vláken materiálu v průběhu tahové zkoušky se změřili například autoři práce [34]. V rámci této studie byly analyzovány tři vzorky, které se lišily orientací vláken výztuže (UD – jednoosá orientace: 0° ; 2AX – dvouosá orientace: $+45^\circ$, -45° ; 3AX – tříosá orientace: 0° , $+45^\circ$, -45°) [34]. K analýze frekvence signálu akustické emise, s ohledem na typ poškození materiálu, byla použita metoda DWT (Discrete Wavelet Transform) v kombinaci s FFT (Fast Fourier Transformation).

Obr. 21 zobrazuje frekvence jednotlivých stádií poškození vzorků. Bylo pozorováno, že střední frekvence, charakteristické pro daný typ poškození byly u všech vzorků podobné [34]:

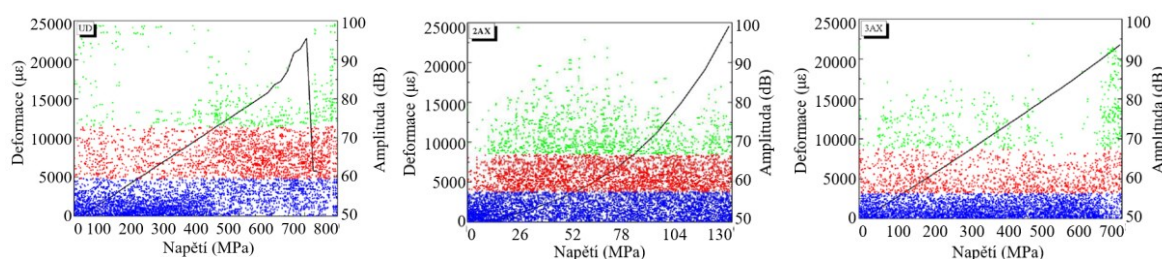
- 125 kHz – praskání matrice
- 300 kHz – oddělování vláken od matrice
- 500 kHz – praskání vláken

Tohle zjištění ukázalo, že frekvence související s konkrétním poškozením stejného materiálu jsou analogické [34, 35]. I přesto se objevilo mnoho odlišností ve frekvenčních komponentách. **Obr. 22a** naznačuje, že frekvence praskání matrice vzorku UD byla více koncentrovaná než u ostatních vzorků. Tato skutečnost může souviset s orientací vláken výztuže. Vlákná výztuže vzorků 2AX a 3AX pravděpodobně více ovlivňovala poškození matrice. Všechny frekvenční komponenty poškození vzorku 2AX byly navíc menší než u ostatních vzorků. To mohlo být způsobeno absencí axiálních vláken výztuže. **Obr. 22c** naznačuje, že frekvence poškození axiálních vláken byly hlavní příčinou výskytu frekvencí odpovídajících porušení vláken. [34]



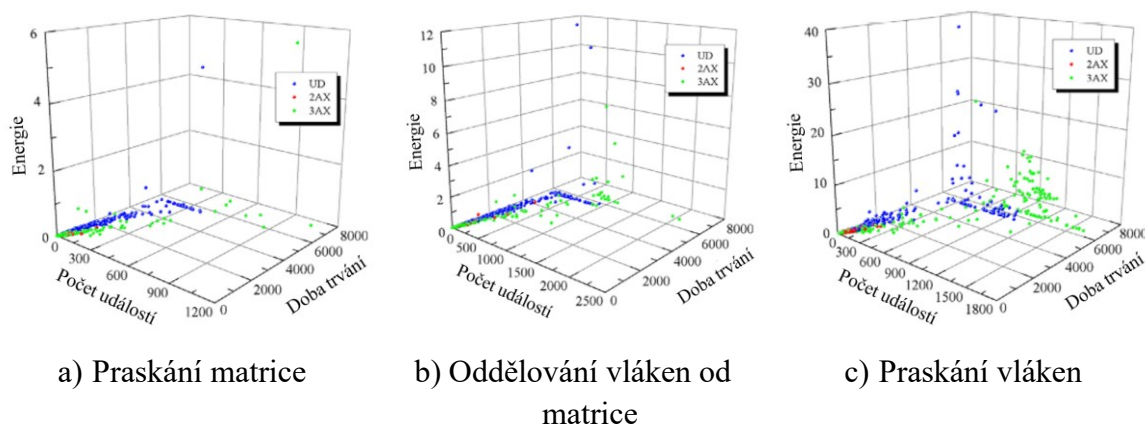
Obr. 22: Frekvence poškození zkoumaných vzorků a) praskání matrice, b) oddělení vlákna od matrice, c) praskání vláken [34]

Výsledky klastrování a deformační křivky jsou zobrazeny na **Obr. 23**. Je vidět, že mezní napětí vzorků bylo velmi odlišné. Při zvýšení napětí se postupně objevily signály s vyšší amplitudou, což ukazuje, že docházelo k dalšímu poškození. Porušení vláken obvykle způsobilo událost akustické emise s amplitudami vyššími než jiné mechanismy poškození. Praskání matrice způsobilo události s nejnižší amplitudou. Mezi nimi leží signály oddělování vláken od matrice a delaminace. Na základě těchto zjištění lze signály porušení vláken připsat amplitudám nad 70 dB a praskání matrice amplitudám pod 60 dB. **Obr. 23** také ukazuje, že u vzorku UD se vyskytovalo mnoho signálů porušení vláken, jejichž amplitudy byly vyšší než 90 až 100 dB. U vzorků 2AX a 3AX byla většina signálů poškození vláken mezi 70 až 90 dB. To naznačuje, že porušení axiálních vláken bylo hlavní příčinou výskytu signálů s vysokou amplitudou. Amplituda signálů poškození axiálních vláken byla u vzorků 2AX a 3AX pravděpodobně snížena smykovým účinkem šikmých vláken. Signály poškození matrice se objevovaly převážně v první polovině zkoušky. Naopak signály poškození vláken se soustředily v závěru zkoušky. U vzorku 2AX však docházelo k intenzivnímu porušení vláken v polovině zkoušky. Příčinu lze pravděpodobně hledat v přítomnosti šikmých vláken a praskání matrice. [34]



Obr. 23: Klastrované signály událostí akustické emise [34]

Při porovnání vlastností signálů jednotlivých typů poškození (**Obr. 24**) je zřejmé, že poškození vláken bylo příčinou vysokoenergetických událostí akustické emise. Z charakteristik signálu lze soudit, že přítomnost šikmých vláken byla příčinou působení smykových sil na matici a axiální vlákna. Tento efekt zvyšoval počet událostí akustické emise a mírně snižoval jejich energii. [34]



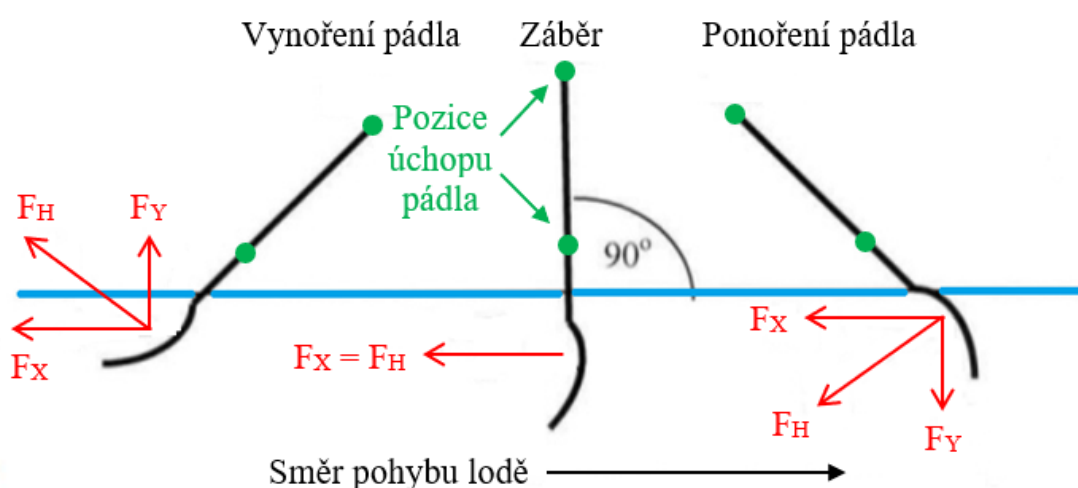
Obr. 24: Charakteristiky signálu akustické emise jednotlivých typů poškození [34]

4 TEORETICKÝ SILOVÝ ROZBOR PÁDLA

Pádlo slouží k přenosu sil z vody na pádlo, potažmo na loď [54]. Pro správnou účinnost záběru je potřeba optimálních mechanických vlastností pádla, zejména tuhosti. Pokud je pádlo příliš tuhé, tvoří se okolo listu pádla během záběru nežádoucí víry. Pokud je pádlo naopak málo tuhé, prodlužuje se přenos síly a snižuje se přesnost záběru. V obou případech dochází ke snížení účinnosti pádla při záběru. [55]

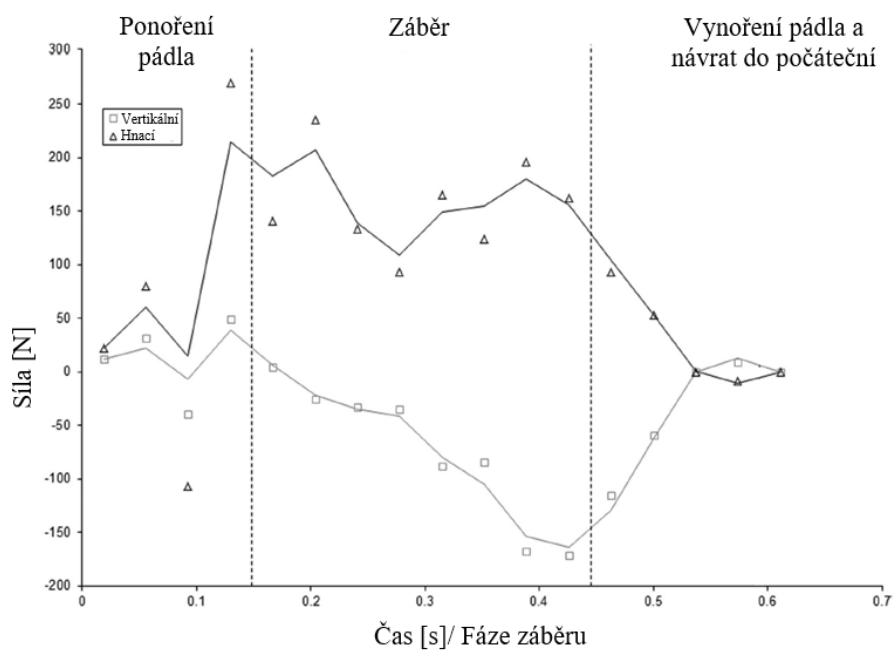
Standardně lze záběr pádlem rozdělit do tří hlavních fází, zobrazených na **Obr. 25**. První z nich je zanoření pádla, od okamžiku, kdy list pádla vstoupí do vody až do úplného ponoření. Poté následuje záběr pádlem ve vodě směrem dozadu vzhledem k lodi. V poslední fázi je list pádla vynořen z vody a vrací se do původní polohy. [56]

Obr. 25 dále zobrazuje síly působící na pádlo v důsledku jeho interakce s vodou. List pádla působí silou proti vodě, což má za následek dopředný pohyb loď. Síla F_H přenášená listem pádla je kombinací tažných sil F_X a zdvihacích sil F_Y působících rovnoběžně a kolmo ke směru pohybu listu (vzhledem k vodě). Hnací síly, které jsou příčinou pohybu lodi, jsou tedy určovány tažnými a zdvihacími silami generovanými listem pádla a způsobem jakým jsou přenášeny na loď. [57]



Obr. 25: Schéma jednotlivých fází záběru pádlem [54]

Obr. 26 zobrazuje profily hnací a vertikální síly v průběhu záběru pádla. Při počátečním ponoření pádla do vody je úhel náběhu malý, a tudíž i síly působící na pádlo, zejména vertikální síla. Po zanoření listu se pádlo začíná pohybovat vodou a dochází k nárůstu hnací síly na maximální hodnotu. V průběhu záběru (kdy se úhel zanoření pádla blíží ke kolmé poloze vzhledem k vodě) je pádlo namáháno vyšší silou, která klesá k nule při vynoření pádla a návratu do počáteční polohy. Jak plyne z **Obr. 26**, pádlo je nejvíce zatíženo právě ve fázi záběru, kdy na něj působí relativně rovnoměrná síla, vyšší než v ostatních fázích [56, 58]. V rámci studie [56] bylo navíc zjištěno, že většina sil působí na dolním konci listu pádla. Jedinou výjimkou je odpor působící ve fázi záběru v důsledku nadměrného natočení pádla (vzhledem ke směru záběru), který působí na horním konci listu.



Obr. 26: Silové profily působící na pádlo v průběhu záběru [56]

5 SHRnutí LITERárních POZNATKŮ

Kompozitní materiály jsou známy a používány již velmi dlouho, avšak svou popularitu získaly zejména v posledních desetiletích. Jejich obliba plyne z výborných mechanických vlastností, jejichž příčinou je tzv. synergický efekt neboli spolupůsobení jednotlivých složek materiálu na výslednou vlastnost.

Kompozitní materiály představují heterogenní materiály složené z matrice a výztuže. **Matrice** plní v kompozitních materiálech funkci pojiva, chrání výztuž proti okolnímu působení a zajišťuje přenos napětí na výztuž. Matrice lze rozčlenit na kovové, polymerní a keramické. Nejširší uplatnění mají matrice polymerní, díky své nízké hustotě, pořizovací ceně a dobré zpracovatelnosti. Do skupiny polymerních matric patří např. polyamid, polyetylen či různé druhy pryskyřic.

Účelem **výztuže** kompozitních materiálů je především zvýšení pevnosti a tuhosti materiálu. Napětí přenášené maticí je absorbováno výztuží, která se vyznačuje výrazně lepšími mechanickými vlastnostmi než běžné materiály. Tyto vlastnosti si do velké míry zachovává i celkový kompozitní materiál. Výztuže se dělí na částicové a vláknové. Vláknové kompozity se dále člení dle délky a orientace vláken. Vytuzující vlákna mají typicky lepší charakteristiky ve směru jejich podélné osy. Z toho plynou i možnosti ovlivnění mechanických vlastností kompozitních materiálů skládáním a různou orientací vláken. V závislosti na typu materiálu lze výztuže rozdělit na uhlíkové, skleněné a aramidové. Každá z těchto skupin se vyznačuje v určité oblasti výbornými vlastnostmi, avšak nejpoužívanější jsou v dnešní době především uhlíková vlákna.

Finální vlastnosti kompozitních materiálů je nutné posuzovat komplexně, nikoli pouze podle vlastností výztuže či matrice. Různé kombinace matric a výztuží tak mohou poskytovat různé hodnoty mechanických vlastností. Obecně však platí, že kompozitní materiály dosahují vyšší pevnosti a modulu pružnosti než materiály kovové (např. ocel).

Podobně jako u ocelí se i u kompozitních materiálů provádí **zkoušky mechanických vlastností**, které jsou definovány normami (ASTM). Z těchto zkoušek lze zmínit např. tahovou a tlakovou zkoušku, zkoušku třibodovým a čtyřbodovým ohybem a smykovou zkoušku.

V průběhu mechanických zkoušek se často paralelně provádí **měření akustické emise**. Pojem akustická emise označuje jak metodu nedestruktivního testování materiálů, tak také fyzikální jev, při kterém dochází k uvolnění napěťových vln v průběhu mechanického namáhání materiálu. Tohoto jevu se využívá např. při detekci strukturálních změn v kompozitních materiálech. Na analyzovaný materiál (vzorek) jsou připevněny snímače, které detekují vznikající události akustické emise. Měřený signál je poté zpracován a vyhodnocen měřícím systémem.

Kompozitní materiály se vyznačují **typickými stádii poškození**, mezi které lze zařadit **praskání matrice, delaminace, odlupování vláken od matrice, lom vláken a šíření trhlin**. Jednotlivým stádiím poškození kompozitních materiálů odpovídají také typické

parametry signálu akustické emise. Pro klasifikaci poškození kompozitů na základě nasnímané akustické emise je podstatný fakt, že amplituda akustické emise souvisí s objemem zdroje akustické emise. Mezi objemem zdroje a amplitudou existuje nepřímá úměra. To např. znamená, že praskání matrice produkuje emisi s nejnižší amplitudou a praskání vláken naopak s vysokou amplitudou.

Při zatěžování materiálů vzniká také spousta dalších módů zatížení, které se projevují v signálu akustické emise a komplikují tak rozlišitelnost konkrétních stádií poškození. Z toho důvodu bývá na naměřený signál aplikována **časově-frekvenční analýza**, která popisuje změny daného signálu v závislosti na času. V datovém souboru se dále prostřednictvím **klastrování** hledají podskupiny datových bodů na základě podobnosti určitého parametru. K těmto podskupinám již poté lze přiřadit konkrétní typ poškození.

Detekci typických **mechanismů** poškození kompozitních materiálů se v současnosti věnuje řada studií, které potvrzují vztah mezi parametry signálu akustické emise a konkrétním typem poškození. V rámci těchto studií bylo zjištěno, že každé stádium poškození se projevuje v určitém frekvenčním intervalu, přičemž k nim dochází v určitém pořadí. Po aplikaci zatížení dohází v první řadě k poškození matrice, která se vyznačuje nižší pevností než výztuž. Stádium poškození matrice je doprovázeno událostmi akustické emise s nižší frekvencí a nižší amplitudou signálu. Napětí se z matrice postupně přenáší na vlákna výztuže, což vede nejprve k delaminaci, oddělování vláken od matrice a po překročení jejich pevnostních charakteristik k porušení samotných vláken. Porušení vláken poté vykazuje vysokofrekvenční signály s vysokou amplitudou. Rozsah hodnot frekvence a amplitudy pro jednotlivá stadia poškození nelze obecně jednoznačně definovat, neboť uvedené mechanismy jsou silně závislé na mnoha parametrech kompozitních materiálů (typ matrice, typ výztuže, počet vrstev materiálu, orientace vláken apod.).

V rámci literární rešerše byl proveden také **silový rozbor jednolistého pádla**. Příčinou mechanického namáhání pádla je jeho interakce s vodou, v důsledku čehož dochází k silovému působení na list pádla. Síla působící na list se mění v závislosti na fázi záběru, potažmo úhlu, pod kterým je pádlo ve vodě ponořeno. Současné studie prokázaly, že největšímu zatížení pádlo podléhá ve střední fázi záběru, kdy se poloha zanoření pádla blíží poloze kolmé k hladině vody. V této oblasti působí na pádlo poměrně rovnoměrná síla, vyšší než v ostatních fázích. Bylo také zjištěno, že většina sil působí na dolní konec listu pádla.

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Předkládaná bakalářská práce s názvem „*Návrh metodiky zkoušení kompozitních trubek určených pro sportovní pádla*“ je zaměřena na stanovení vybraných mechanických vlastností trubek, vyrobených z různých kompozitních materiálů, prostřednictvím metody měření akustické emise. Hlavním cílem této práce je navržení metodiky zkoušení kompozitních trubek pro metodu akustické emise na základě analýzy namáhání pádla. Dílčí cíle bakalářské práce lze vytýčit do následujících bodů:

- Vypracování **teoretického úvodu** do problematiky kompozitních materiálů a měření akustické emise; provedení literární rešerše s cílem zmapovat aktuální poznatky z oblasti využití akustické emise při zkoušení kompozitních materiálů.
- Provedení teoretického **silového rozboru pádla** s využitím dostupných informací, za účelem zjištění způsobu namáhání a korektního nastavení metodiky měření trubek.
- **Návrh zkušebního přípravku** pro trhačí stroj TESTOMETRIC M500-50CT na základě silové analýzy pádla.
- **Návrh zkušební metodiky** ohybových zkoušek kompozitních trubek pro metodu akustické emise.
- **Provedení měření** na třech sériích vzorků kompozitních trubek z různých materiálů dle navržené metodiky.
- Analýza a **vyhodnocení** naměřených **výsledků**.

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

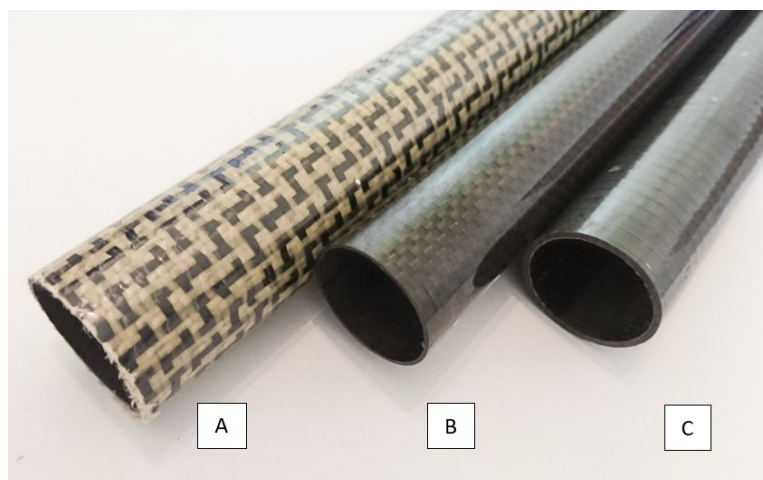
Cílem experimentální části bakalářské práce bylo zkoušení kompozitních trubek, lišících se různými parametry. V následujících kapitolách je uvedena charakteristika zkušebních vzorků, popis navržené metodiky zkoušení trubek a hodnocení výsledků.

7.1 Charakteristika zkušebních vzorků

Měření se provádělo na trubkách, vyrobených ze tří různých kompozitních materiálů s odlišnými vlastnostmi. Charakteristické vlastnosti zkušebních vzorků a jejich materiálů jsou uvedeny v **Tabulce II**. Ukázku zkušebních vzorků uvádí **Obr. 27**. Tyto vzorky se lišily jednak typem použitého materiálu, uspořádáním vláknové výztuže ale i počtem vrstev jednotlivých komponent, což také zapříčinilo různé tloušťky stěn vzorků. Pro lepší vypovídací schopnost výsledků, bylo měření každého typu trubky opakováno na třech vzorcích (označených A1, A2, A3, u materiálů B a C analogicky).

Tabulka II Charakteristika zkušebních vzorků

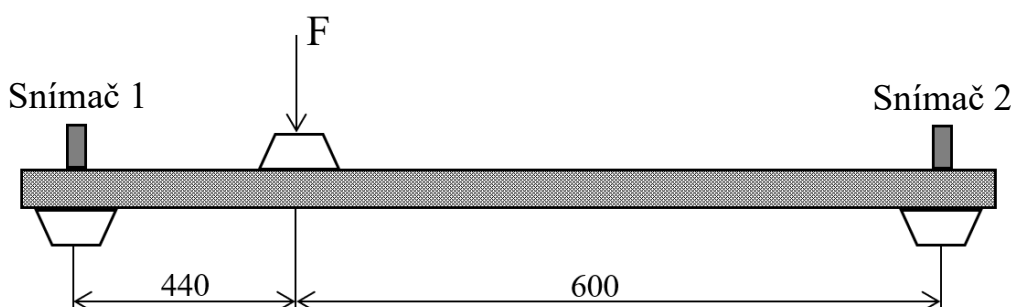
Označení vzorku	Materiál	Počet vrstev (1)	Celkový počet vrstev (1)	Hustota (g.m ⁻²)	Tloušťka stěny (mm)
A	jednosměrné uhlíkové vlákno	4	5	200	1,45
	tkanina aramid/uhlík [0°-90°]	1		175	
B	jednosměrné uhlíkové vlákno	2	3	300	0,9
	uhlíková tkanina [0°-90°]	1		175	
C	jednosměrné uhlíkové vlákno	4	4	300	1,42



Obr. 27: Ukázka zkušebních vzorků

7.2 Schéma měření

Na základě silového rozboru pádla byla pro měření kompozitních trubek zvolena zkouška tříbodovým ohybem. Rozložení podpor a zatěžující síly mělo za cíl napodobit namáhání pádla ve fázi záběru s uvážením pozic úchopu (viz **Obr. 25**). Po konzultaci s provozním partnerem, bylo navrženo schéma měření, zobrazené na **Obr. 28**. V průběhu měření byl na vzorcích snímán signál akustické emise pomocí dvou snímačů, upevněných v polohách podpor. Podpory (i snímače) byly od sebe vzdáleny 1040 mm. Síla působila ve vzdálenosti 440 mm od snímače č. 1.

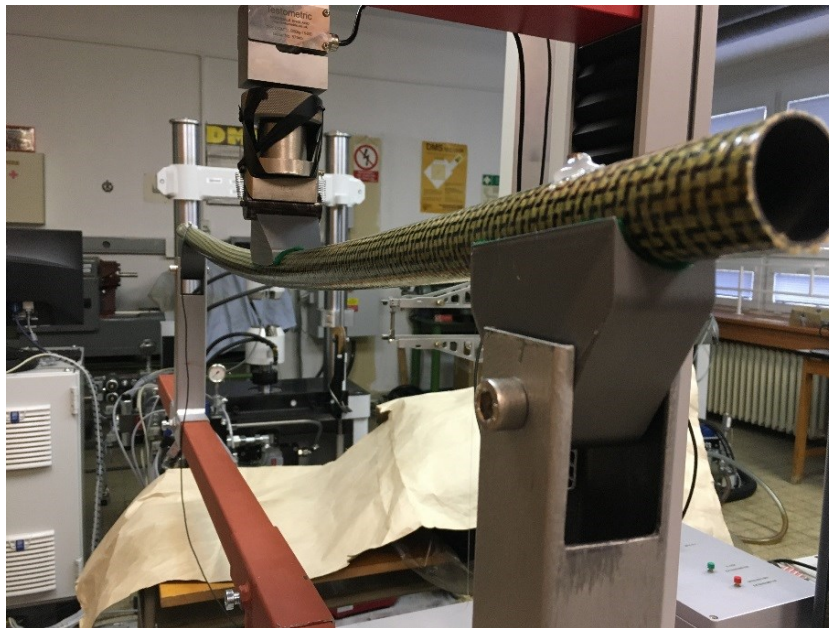


Obr. 28: Schéma měření

Zkoušky tříbodového ohybu byly prováděny na zkušebním stroji TESTOMETRIC M500-50CT, na kterém byl umístěn pro dané účely vyrobený zkušební přípravek, zobrazený na **Obr. 29**. Rozměry přípravku respektovaly navržené schéma měření s ohledem na umístění stacionárního působíště zatěžující síly. Aby se eliminoval vznik nežádoucích rušivých signálů akustické emise vlivem tření vzorku o podpory, byly stykové části vybaveny plstí. Zkouška byla řízena deformačně, přičemž rychlost horní čelisti byla nastavena na 10 mm/min.



Obr. 29a: Zkušební přípravek



Obr. 29b: Zkušební přípravek se vzorkem v průběhu testování metodiky

V průběhu testovacích zkoušek došlo k poškození jednoho ze snímačů akustické emise vlivem náhlého roztržení vzorku. Kvůli eliminaci poškození dalších snímačů, byl samotný vzorek se snímači umístěn do novodurové trubky o průměru 100 mm, jak je zřejmé z Obr. 30.



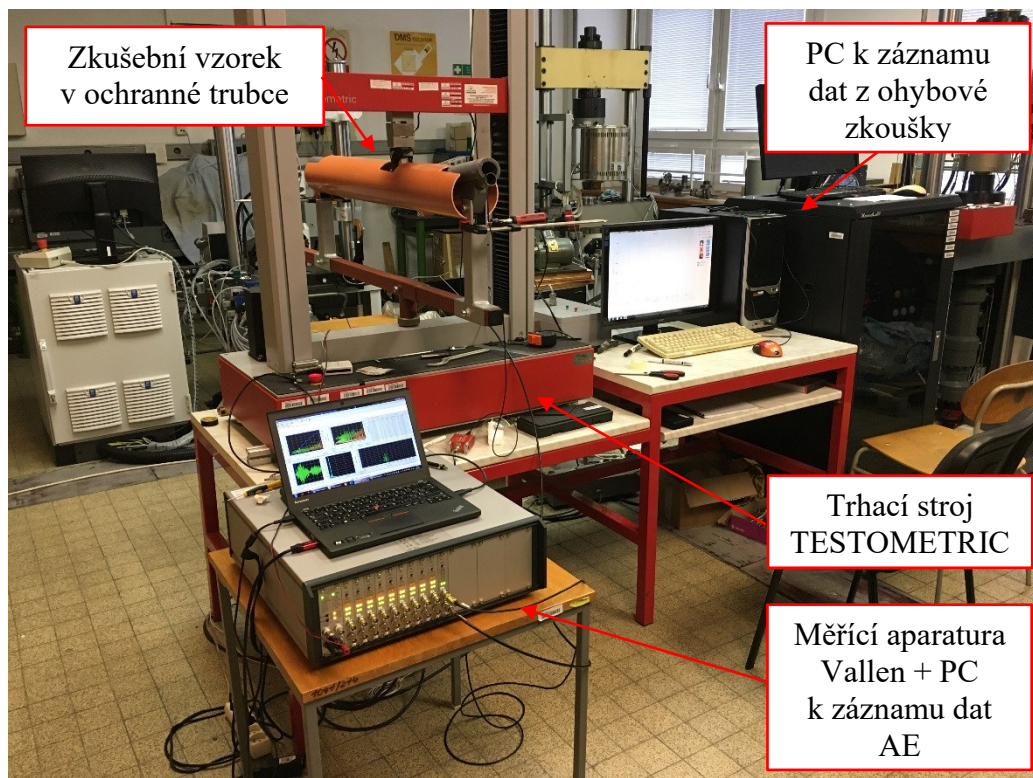
Obr. 30: Optimalizované uložení vzorku

7.3 Měřicí aparatura

Veškerá měření byla realizována aparaturou Vallen AMSY-6. Systém AMSY-6 je vícekanálový systém měření akustické emise (AE), který se skládá z paralelních měřicích kanálů. V průběhu ohybových zkoušek byly využity celkem dva měřicí kanály, jež jsou součástí jednoho signálového procesoru ASIP-A2.

K samotnému měření byly využity širokopásmové snímače akustické emise Vallen VS 900-M s použitelným frekvenčním spektrem v rozsahu 100-900 kHz. Snímaný signál se následně zesiloval s využitím předzesilovačů Vallen AEP5H, pracujících ve frekvenčním rozsahu 20 kHz až 2,4 MHz. Hodnota zesílení činila 34 dB (odpovídá padesátinásobnému zesílení signálu). Vzorkovací frekvence dat akustické emise byla rovna 10 MHz, přičemž samotné vlnové průběhy byly vzorkovány dvojnásobnou frekvencí, tedy 20 MHz.

Schéma zkušební sestavy pro měření tříbodového ohybu je včetně měřící aparatury zobrazeno na **Obr. 31**.



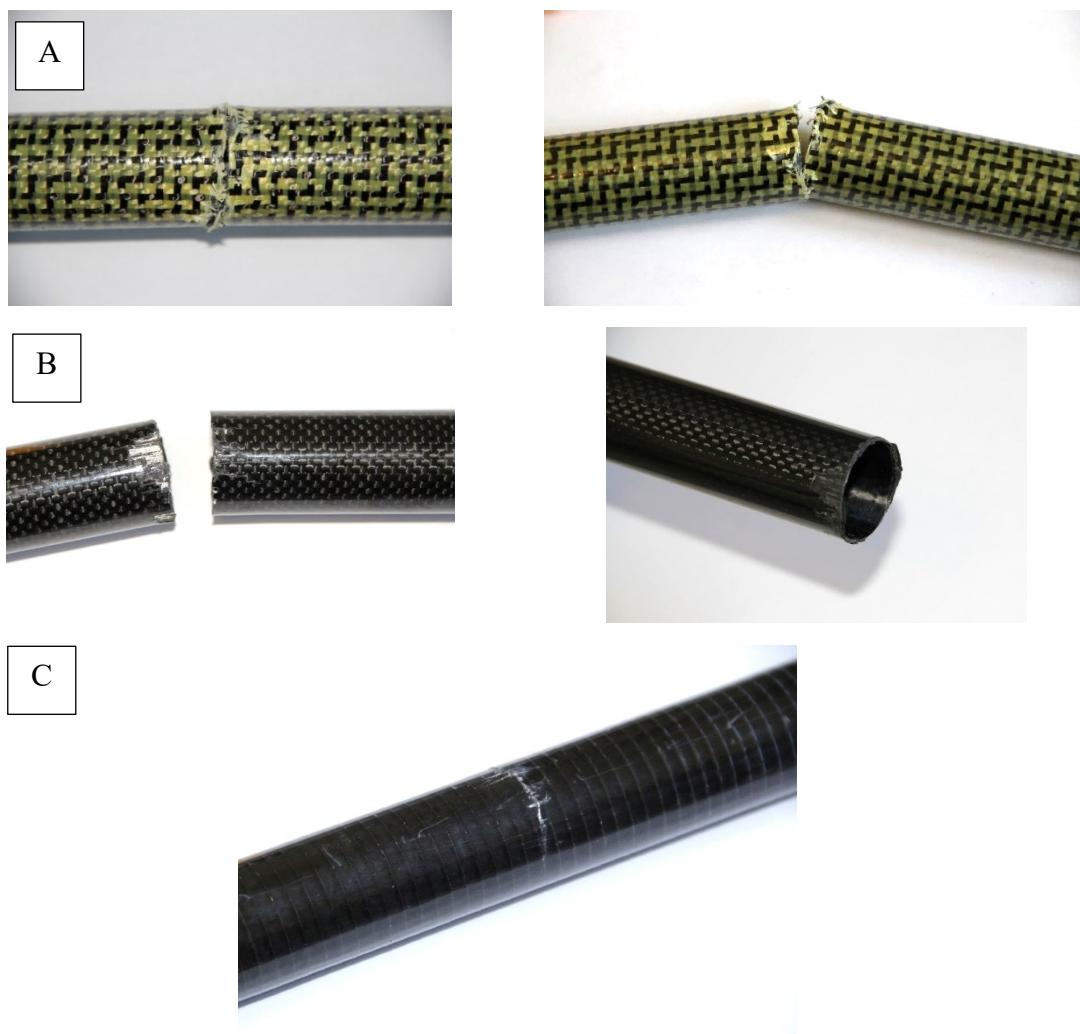
Obr. 31: Dispozice měřicího zařízení s aparaturou pro měření akustické emise

7.4 Analýza dat

Následující podkapitoly jsou zaměřeny na analýzu dat z ohybových zkoušek a dat získaných měřeními akustické emise v průběhu těchto zkoušek.

7.4.1 Porušení vzorků

Zkušební vzorky z materiálu A, B a C podrobené ohybové zkoušce jsou zobrazeny na **Obr. 32**. Jak je vidět, testované materiály se lišily způsobem porušení. U materiálu A došlo k částečnému rozdělení vzorku. Díky aramidovým vláknům si trubka udržela částečnou soudržnost i po přelomení. V případě materiálu B došlo k úplnému přelomení. Na vzorku materiálu C vznikla prasklina, ovšem soudržnost vzorku byla zachována.

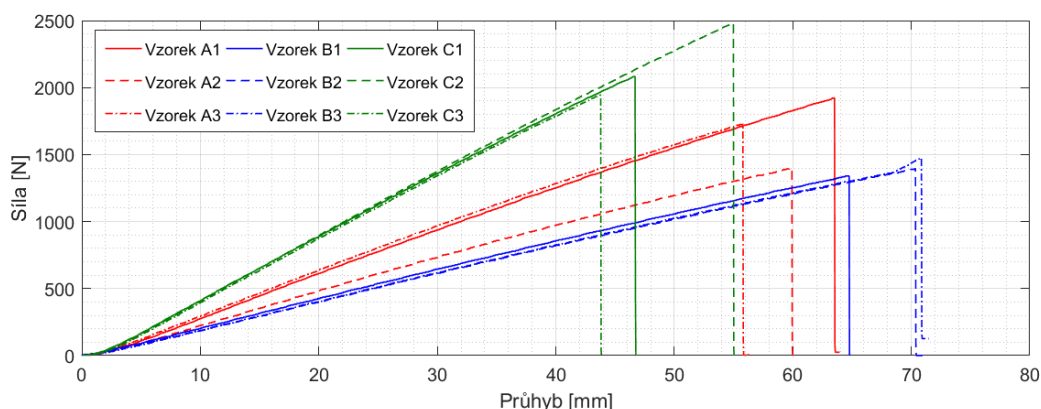


Obr. 32: Způsob porušení vzorků při ohybové zkoušce

7.4.2 Hodnocení tuhosti trubek

V průběhu ohybové zkoušky byla zjištěna závislost průhybu trubek na zatěžující síle, kterou zobrazuje **Obr. 33**. Maximální síly odpovídající porušení vzorku jsou uvedeny v **Tabulce III**. Jak je vidět, u všech tří sérií vzorků vykazovaly hodnoty maximální síly poměrně výrazný rozptyl.

Co se týče tuhosti, její míra se napříč sériemi příliš nelišila, kromě vzorku A2, který vykazoval podstatně menší tuhost ve srovnání s ostatními vzorky v sérii. Nejlepší výsledky byly naměřeny u série C, následované sérií A a B. Výsledky odpovídaly kombinaci vlastností jednotlivých vzorků (tloušťce stěny, počtu vrstev a orientaci vláken). Příčinou vysoké tuhosti vzorků C byla pravděpodobně orientace uhlíkových vláken ve směru osy vzorku, ve kterém vykazují lepší mechanické vlastnosti než ve směru příčném. Vzorky série C navíc jako jediné neobsahovaly tkaninu, což mohlo mít také souvislost s jejich vyšší tuhostí. Jak bylo rozebráno v kapitole 3.1.3, přítomnost vláken tkaniny, orientovaných v jiném než podélném směru, mohla vlivem interakce s podélnými vlákny negativně ovlivnit vlastnosti vzorků série A a B.



Obr. 33: Výsledky ohybové zkoušky

Tabulka III Hodnoty maximálních sil [N]

Označení vzorku	1	2	3
A	1923	1400	1730
B	1340	1395	1474
C	2083	2478	1944

7.4.3 Identifikace mechanismů porušení vzorků prostřednictvím akustické emise

Jak již bylo řečeno výše, akustická emise byla snímána pomocí dvou snímačů, umístěných nad podporami vzorku (viz **Obr. 28**). Aby byla zjištěna korektní amplituda zdroje akustické emise v průběhu ohybových zkoušek, provedlo se v první řadě měření útlumu na základě metodiky stanovené normou EN ISO 16148:2006 [59]. V průběhu šíření napětových vln materiálem dochází totiž k jejich útlumu v závislosti na prostředí (materiálu), což by mohlo vést ke zkreslení výsledků. Získané hodnoty útlumu blízkého a vzdáleného pole jsou uvedeny v **Tabulce IV**. Tyto hodnoty byly využity pro korekci amplitud zdrojů akustické emise.

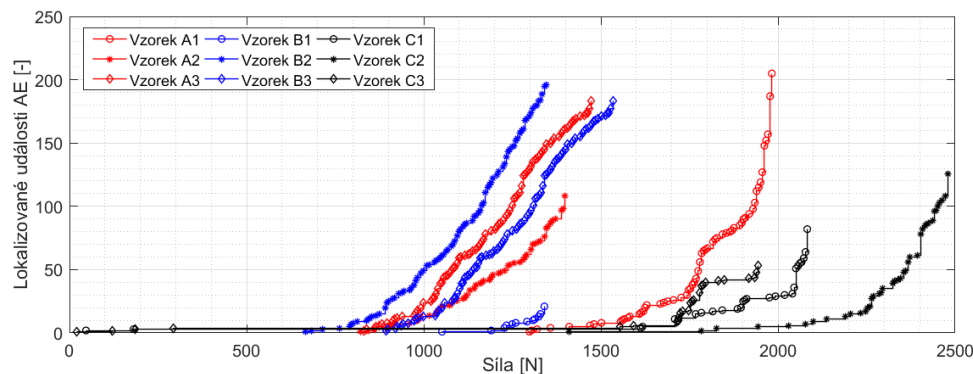
Tabulka IV Výsledky měření útlumu

Série vzorků	Útlum blízkého pole [dB/m]	Útlum vzdáleného pole [dB/m]
A	90	33,3
B	66,6	33,2
C	222,2	36,2

Po naměření byla data akustické emise filtrována ve smyslu lineární lokalizace zdrojů. Filtr oddělil data, která se vygenerovala v blízkosti působíště síly F s povolenou odchylkou ± 100 mm od zdroje. Akceptovány tedy byly lokalizované události, vznikající v oblasti 340 až 540 mm od snímače č. 1 (působíště síly 440 mm od snímače č. 1 – viz **Obr. 28**).

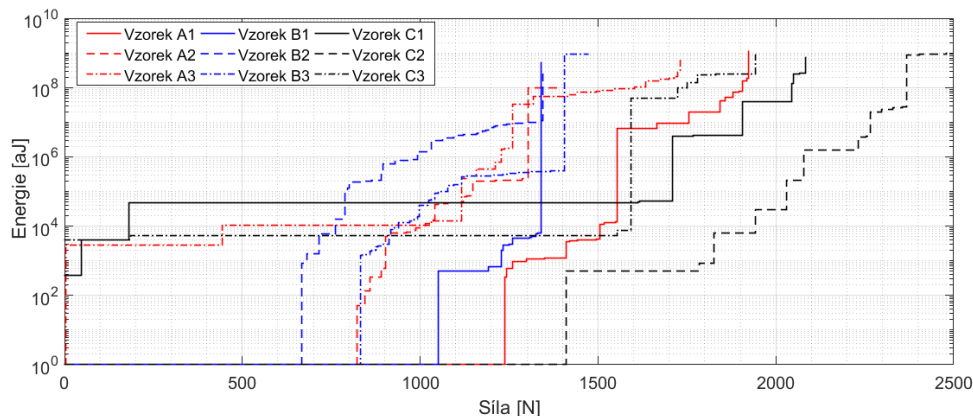
Obr. 34 znázorňuje kumulativní počet lokalizovaných událostí akustické emise v závislosti na síle F . Jak je vidět, kumulativní počty událostí akustické emise jednotlivých

materiálů vykazují značný rozptyl. Tento jev je do jisté míry pochopitelný. Vzhledem k tomu, že vzorky byly vyráběny ručně, lze očekávat určité odlišnosti, které se mohou projevit rozptylem vlastností materiálu. U všech vzorků však dochází k nárůstu aktivity akustické emise zhruba ve 2/3 maximální síly.



Obr. 34: Lokalizované události akustické emise v závislosti na síle

Na **Obr. 35** je zobrazena závislost energie lokalizovaných událostí akustické emise na zatěžující síle. Maximální energie lokalizovaných událostí akustické emise dosahovala hodnot v rozmezí 10^8 až 10^9 aJ. Nárůst energie událostí v průběhu ohybové zkoušky se u jednotlivých materiálů lišil. U vzorků materiálu A docházelo k relativně plynulému nárůstu energie v průběhu zatěžování (vyjma vzorku A3). Tento jev lze přiřadit přítomnosti tkaniny s aramidovými vlákny v horních vrstvách vzorků. U vzorků materiálu B a C byl zaznamenán nárůst energie převážně v závěru zatěžování, jež doprovázela náhlá ztráta integrity vzorku.

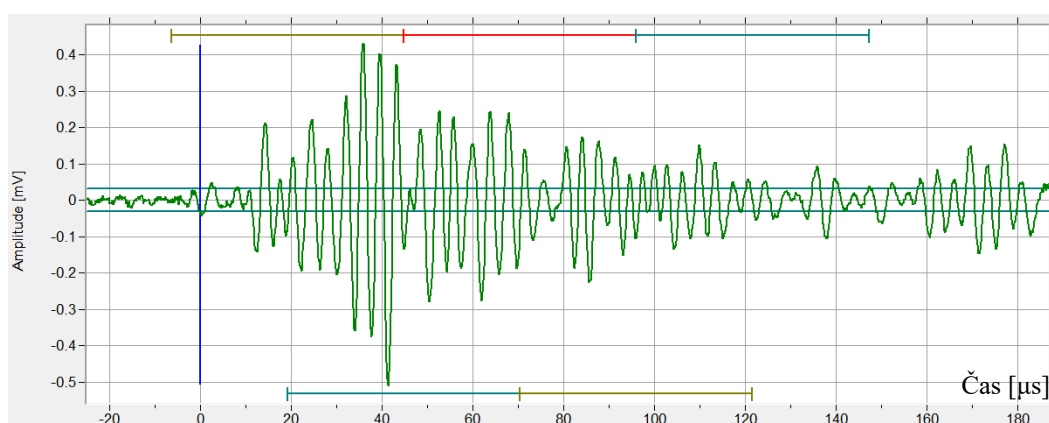


Obr. 35: Závislost energie lokalizovaných událostí akustické emise a zatěžující síly

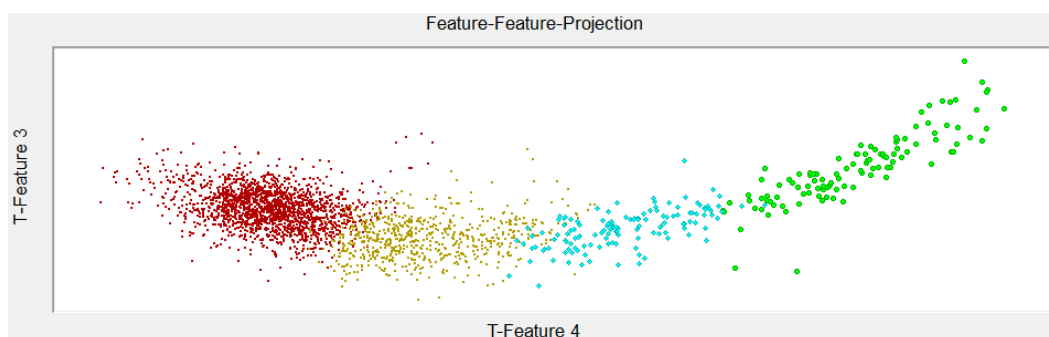
Rozlišení mechanismů porušení kompozitních materiálů, mezi které patří praskání matrice, delaminace jednotlivých vrstev materiálu nebo porušení vláken výztuže, je poměrně složitý proces, jak dokazuje rozbor literárních poznatků, uvedený v kapitole 3.

Pro další analýzu dat, zaměřenou na identifikaci mechanismů poškození testovaných materiálů, byl využit software Vallen VisualClass. Tento program pracuje na principu

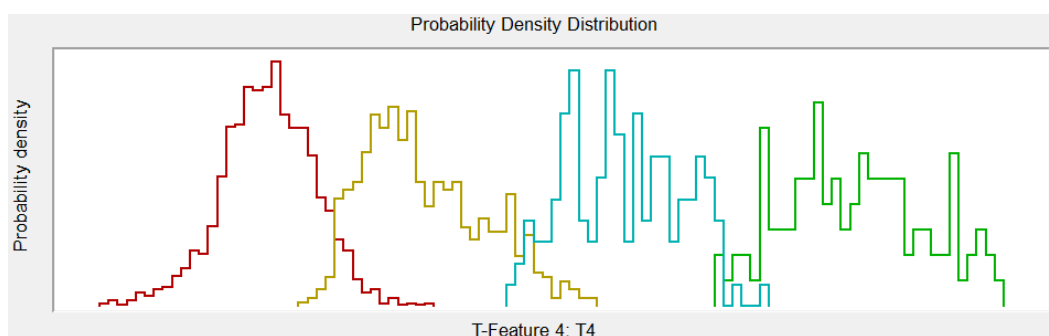
tzv. strojového učení bez učitele (unsupervised learning approach), při kterém není znám konkrétní výstup (odezva materiálu) pro jednotlivé mechanismy porušení. Analyzován byl soubor dat, obsahující vlnové průběhy (viz **Obr. 36**), naměřené v průběhu ohybové zkoušky. Po nahrání souboru do programu, bylo nutné definovat frekvenční rozsah, počet časových segmentů, na kterých se prováděla analýza a jejich délku (viz **Obr. 36**). Prostřednictvím FFT (rychlé Fourierovy transformace), byly poté extrahovány atributy signálu (charakteristické vlastnosti). Výsledkem analýzy byly 4 klastry (počet je volitelný) obsahující signály s podobnými vlastnostmi v jednotlivých časových segmentech. **Obr. 37** znázorňuje klastry s filtrovanými signály a **Obr. 38** hustotu pravděpodobnosti signálu v jednotlivých klastrech.



Obr. 36: Zobrazení analyzovaných časových segmentů signálu

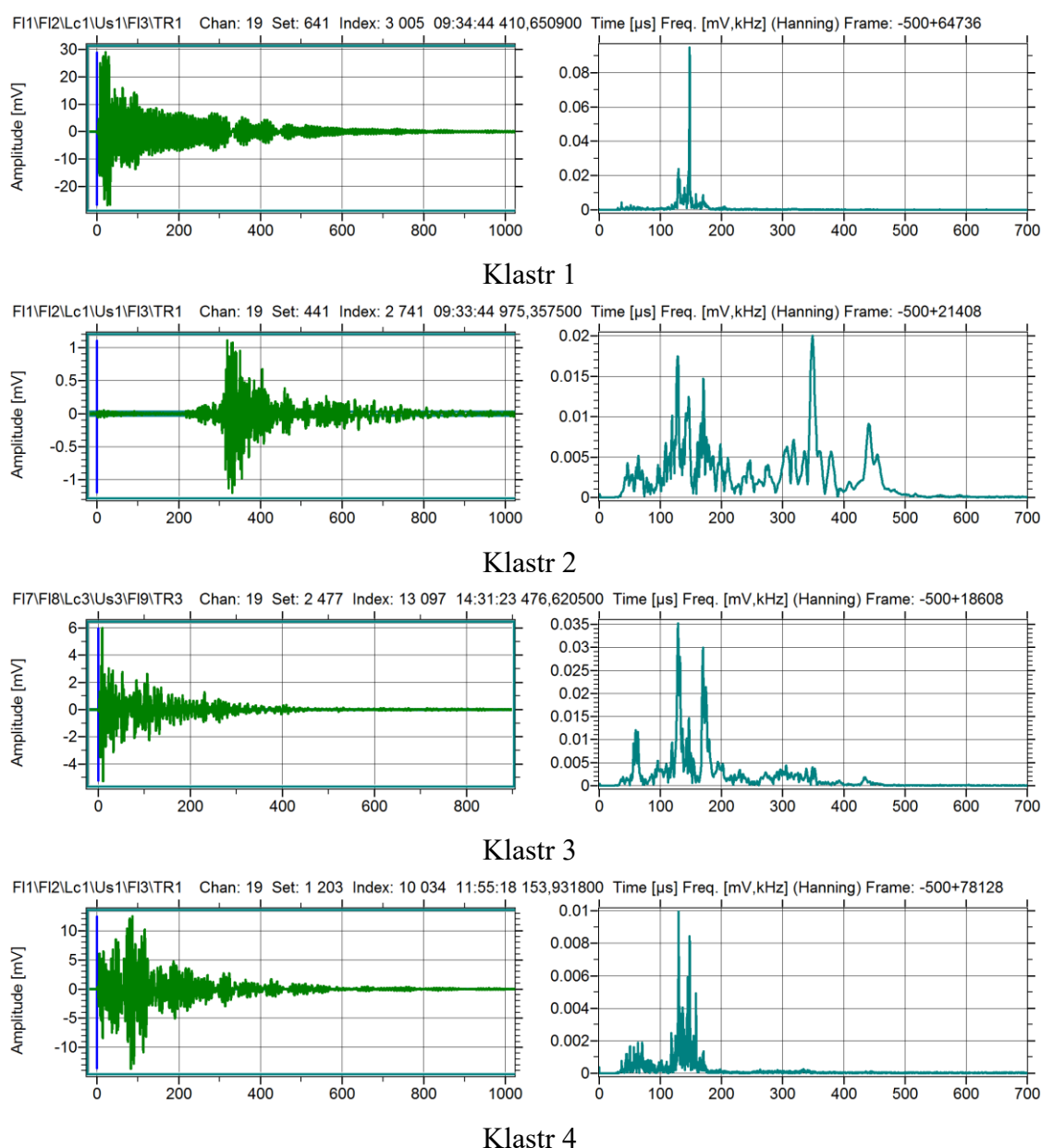


Obr. 37: Klastry s filtrovanými signály



Obr. 38: hustota pravděpodobnosti signálů v klastrech v závislosti na transformovaných atributech

Charakteristické amplitudy a frekvence signálů, přiřazených do jednotlivých klastrů, jsou uvedeny v **Tabulce V**. Signály, spadající do prvního klastru charakterizuje amplituda, obvykle přesahující 95 dB_{AE} s frekvenčním spektrem v rozmezí 50 až 150 kHz. Lze identifikovat také složky signálu s frekvencemi 200 až 350 kHz. Signály zařazené do druhého klastru měly většinou amplitudu v rozsahu 40 až 65 dB_{AE}. Frekvenční spektrum signálů tohoto klastru mělo rozsah 50 až 450 kHz, přičemž se vyskytovaly dvě skupiny signálů s frekvencí pod 200 kHz a nad 200 kHz. Pro signály ve třetím klastru byla charakteristická amplituda 70 až 90 dB_{AE} a frekvenční spektrum v rozsahu 50 až 300 kHz. Signály přiřazené čtvrtému klastru charakterizovaly amplitudy v rozmezí 90 až 110 dB_{AE} a frekvenční rozsah 50 až 200 kHz. Příklady signálů z jednotlivých klastrů a jejich frekvenčního spektra jsou uvedeny na **Obr. 39**.



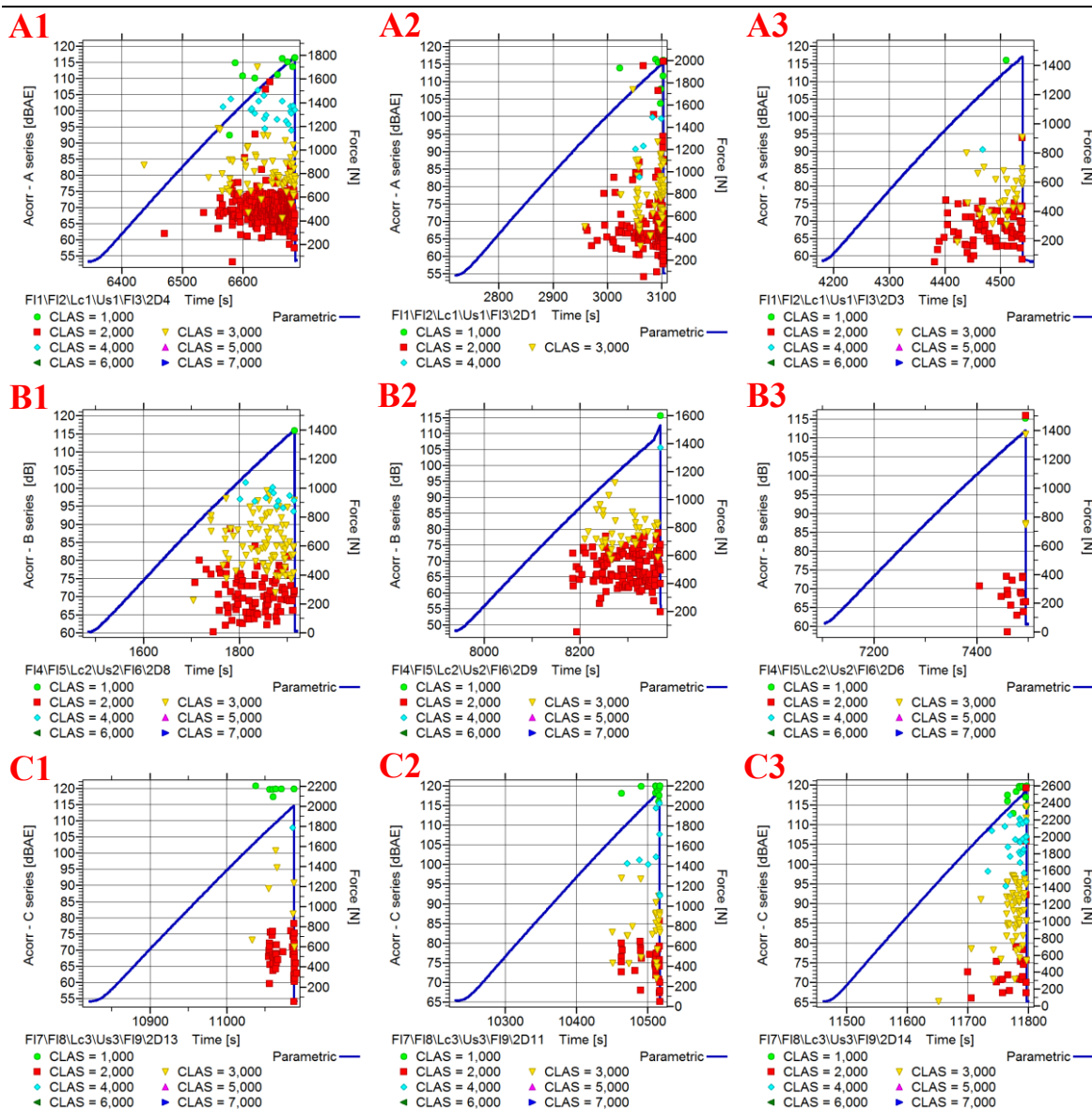
Obr. 39: Příklady signálů z jednotlivých klastrů (vlevo: amplituda, vpravo: frekvence)

Obr. 40 znázorňuje výskyt událostí akustické emise charakterizovaných korigovanou amplitudou a silu v závislosti na času. Je zřejmé, že u všech skupin vzorků začíná aktivita akustické emise výskytem signálů přiřazených druhému klastru. Tyto signály vykazovaly frekvenční spektrum 50 až 200 kHz. Jak bylo uvedeno výše (**Tabulka V**), v signálech druhého klastru byly rozlišeny dvě podskupiny signálů s frekvenčními rozsahy 50 až 200 kHz a 200 až 450 kHz. Na základě uvedených skutečností lze soudit, že signály o frekvenci 50 až 200 kHz je možné přisoudit porušení matrice a skupinu signálů o vyšší frekvenci 200 až 450 kHz porušení jednotlivých uhlíkových vláken. Podobné závěry lze aplikovat také na signály příslušící klastru č. 3. Signály klastru č. 4 jsou charakteristické pro porušení o vyšším rozsahu, které svým charakterem (vysoké amplitudy a energie, nižší frekvence) odpovídá delaminaci materiálu, případně rozsáhlejšímu porušení matrice. V poslední třetině zkoušky se vyskytly vysokoenergetické signály s amplitudami nad 110 dB_{AE}, náležící klastru č. 1. Tato skupina signálů byla také rozčleněna na nízkofrekvenční signály do 200 kHz, představující rozsáhlejší delaminaci, a vysokofrekvenční signály od 100 do 400 kHz příslušící skupinovému poškození uhlíkových vláken.

Tabulka V Charakteristické vlastnosti signálů v jednotlivých klastrech

	Klastr 1	Klastr 2	Klastr 3	Klastr 4
Amplituda [dB_{AE}]	>95	40 až 65	70 až 90	90 až 110
Frekvence [kHz]	50 až 150 200 až 350	50 až 200 200 až 450	50 až 300	50 až 200
Energie [aJ]	>10 ⁶	10 ³ až 10 ⁴	10 ¹ až 10 ³	10 ⁵ až 10 ⁶

Z **Obr. 40** je rovněž patrné, že nejvyšší aktivitu vykazovaly vzorky série A a B. U těchto vzorků aktivita akustické emise započala událostmi s nižší amplitudou (do cca 75 dB_{AE}, viz **Tabulka V**) spadajícími do klastru č. 2, které značí porušení matrice, následovanými událostmi spadajícími do klastru č. 3. Příčinou může, do určité míry, být použití tkanin s nižší hustotou a v případě série A rovněž přítomnost aramidu. Se zvyšováním zatěžující síly se dále objevily události náležící klastru č. 4, které značily vznik delaminace. Tyto události se však u sérií A a B vyskytovaly v poměrně malé míře. Ke konci zkoušky série A byly zaznamenány události klastru č. 1 (s amplitudou nad 110 dB_{AE}), odpovídající poškození jednotlivých vláken. U vzorků série B se tyto události téměř nevyskytly. Pravděpodobnou příčinou byl nižší počet vrstev ve srovnání se sériemi A a C. Tomuto předpokladu napovídá také skutečnost, že vzorky B vykazovaly menší tuhost, a tudíž docházelo k postupnému vzniku porušení v malých objemech. Také u série C se zpočátku zkoušky vyskytovaly události spadající do klastru č. 2 a 3, značící poškození matrice, ovšem v menším počtu než u předchozích sérií vzorků. Lze také soudit, že v nepatrně vyšší míře docházelo k delaminaci materiálu, o čemž svědčí výskyt událostí spadajících do klastru č. 4. Zaznamenán byl také častější výskyt událostí s vysokou amplitudou (klastr č. 1), značící porušení vláken.



Obr. 40: Výskyt událostí akustické emise rozřazených do klastrů u jednotlivých vzorků

8 ZÁVĚR

Předkládaná bakalářská práce se zabývala návrhem metodiky zkoušení kompozitních trubek, určených pro výrobu jednolistých pádel. V rámci teoretické části práce byl vypracován stručný úvod do problematiky kompozitních materiálů, shrnující základní poznatky týkající se charakteristiky kompozitních materiálů, druhů jejich matric a výztuží. Popsány byly také normované metody zkoušení mechanických vlastností kompozitních materiálů. Značná pozornost byla věnována charakteristice metody akustické emise, jejímu využití při zkoušení kompozitních materiálů a identifikaci typických mechanismů porušení struktury.

Na základě literárních poznatků byl proveden silový rozbor jednolistého pádla. Bylo zjištěno, že pádlo je namáháno silou, způsobenou jeho interakcí s vodou, která působí na dolním konci listu pádla. Tato síla se mění v závislosti na fázi záběru. S ohledem na rozložení pozic úchopu pádla a silového působení lze namáhání pádla v laboratorních podmínkách nejlépe napodobit třibodovým ohybem.

V rámci experimentální části práce byla navržena **metodika zkoušení kompozitních trubek**. S ohledem na poznatky ze silového rozboru pádla byla metodika založena na zkoušce třibodového ohybu. Rozměrové schéma měření bylo navrženo po konzultaci s průmyslovým partnerem. Metodika byla navrhována pro zkušební stroj TESTOMETRIC M500-CT. Aby bylo možné na tomto stroji provádět zkoušky trubek na třibodový ohyb, byl vyroben testovací přípravek, který sloužil jako podpora vzorků, přičemž jeho rozměry byly přizpůsobeny stacionárnímu působišti zatěžující síly (síla působila ve vzdálenosti 440 mm od první podpory). V průběhu zkoušek byl na vzorcích snímán signál akustické emise pomocí dvou snímačů, umístěných v polohách podpor. Kvůli eliminaci poškození snímačů bylo nutné umístit samotné vzorky do novodurové trubky.

Navržená metodika byla následně použita pro **zkoušení tří sérií vzorků** kompozitních trubek. Série vzorků A byla tvořena čtyřmi vrstvami jednosměrného uhlíkového vlákna a jednou vrstvou aramidové tkaniny, série B dvěma vrstvami jednosměrného uhlíkového vlákna a jednou vrstvou uhlíkové tkaniny a série C čtyřmi vrstvami jednosměrného uhlíkového vlákna. Poznatky z oblasti mechanických vlastností vzorků, zjištěné v průběhu zkoušek lze shrnout do následujících bodů:

- U trubek z různých materiálů docházelo po aplikaci ohybového namáhání k různým způsobům porušení. Trubky série A se částečně porušily, ovšem díky aramidovým vláknům si udržely částečnou soudržnost. U trubek série B došlo k úplnému přelomení. Na trubkách série C vznikla pouze prasklina.
- Nejvyšší tuhost byla naměřena u vzorků série C, následované sérií A a B. Rozdíl v maximální zatěžující síle u sérií C a B činil až 1138 N. Nižší tuhosti vzorků série A a B mohla napomoci přítomnost vrstvy tkaniny.

Pro korektní výsledky měření akustické emise bylo nutné ještě před započítáním zkoušek provést měření útlumu blízkého a vzdáleného pole a lokalizaci zdrojů akustické emise,

přičemž byly akceptovány události s odchylkou ± 100 mm od zdroje. Naměřený signál byl poté podroben rychlé Fourierově transformaci a klastrován na základě charakteristických atributů. Z **analýzy dat akustické emise** vyplynuly následující závěry:

- Z nárůstu lokalizovaných událostí akustické emise lze soudit, že porušení všech vzorků započínalo při působení 2/3 maximální zatěžující síly.
- U vzorků série A docházelo k plynulému nárůstu energie lokalizovaných událostí akustické emise. Pravděpodobnou příčinou byla přítomnost aramidové tkaniny. U vzorků B a C docházelo k nárůstu energie převážně v závěru zatěžování.
- Analýza klastrovaného signálu napomohla identifikovat frekvence a amplitudy jednotlivých mechanismů porušení vzorků. Lze říct, že v průběhu namáhání vzorků docházelo k porušení matrice v různém rozsahu, delaminaci a porušení vláken.
- U vzorků série A byly detekovány signály značící porušení matrice, následované delaminací a na konci zkoušky také praskáním vláken.
- U série B se taktéž zpočátku vyskytly signály porušení matrice a v menší míře delaminace. Téměř se nevyskytly signály odpovídající poškození vláken. Tento jev pravděpodobně souvisel s nižším počtem vrstev materiálu a nižší tuhostí vzorků.
- Vzorky série C vykazovaly signály poškození matrice a v nepatrně vyšší míře delaminaci. Častěji se také vyskytovaly signály značící porušení vláken.

9 LITERATURA

- [1] BENEŠ, L. *Materials Science II: Introduction of composites: Studijní text*. Praha: ČVUT v Praze, 2017. Také dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matscienceii/COMPOSITES%20 %20introduction.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matscienceii/COMPOSITES%20%20introduction.pdf)
- [2] *Talentica.cz: Vláknové kompozity. Jak se vyrábějí a kde najdeme jejich využití?* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.talentica.cz/vlaknove-kompozity/>
- [3] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [4] MACOSZEK, A. *Mechanické a tepelné vlastnosti uhlíkových materiálů*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [5] VNOUČEK, M. *Kompozitní materiály: Přednášky k předmětu Strojírenské materiály*. Plzeň: ZČU v Plzni. Také dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [6] KAPADIA, A. Nondestructive testing of composite materials. *NDT International*. 1988, 21(6). DOI: 10.1016/0308-9126(88)90307-0. ISSN 03089126. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0308912688903070>
- [7] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály – modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-708-3972-4.
- [8] ČERNOCH, R. *Vliv rychlosti deformace na pevnostní charakteristiky vláknového kompozitu s polymerní maticí*. Ostrava, 2018. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [9] LUČANOVÁ, M. *Keramické a kompozitní materiály ve vybraných odvětvích lidské činnosti*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [10] HRUDŇÁK, M. *Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro malé sportovní letouny*. Praha, 2004. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [11] *Kompozitní materiály: Přednáška k předmětu Nauka o materiálu II*. ČVUT v Praze. Také dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [12] MELICHAŘÍK, O. *Metodika měření mechanických vlastností kompozitů*. Ostrava, 2017. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [13] *Havel Composites CZ s.r.o.: Katalog materiálů*. [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://www.havel-composites.com/uploads/files/havel_katalog%202011.pdf
- [14] ČERMÁK, P. *Aramidová vlákna, ekonomické aspekty jejich zpracování*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [15] CHENG, M., CHEN, W., WEERASOORIYA, T. Mechanical Properties of Kevlar® KM2 Single Fiber. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2005, **127**(2), 197-203. DOI: 10.1115/1.1857937. ISSN 0094-4289.
- [16] AVCI, H., HASSANIN A., HAMOUDA T. a KILIC A. High Performance Fibers: A Review On Current State Of Art and Future Challenges. *Journal of Engineering and*

-
- Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*. 2019, **27**(2), 85-92. DOI: 10.31796/ogummf.558453. ISSN 2630-5712.
- [17] BEDNÁR, P. *Návrh upravené technologie navíjení kompozitních trubek*. Brno, 2016. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [18] *Intertek: Tensile Testing Composite ASTM D3039* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.intertek.com/polymers/tensile-testing/matrix-composite/>
- [19] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. 2015. ISBN 978-80-88058-68-7 [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [20] ASTM D695-15. *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. ASTM International, 2015. DOI: 10.1520/D0695-15
- [21] *Intertek: Flexural Test Composites Four-Point Bending ASTM D6272* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.intertek.com/polymers/composites/flexural-test-composites-four-point-bending-astm-d6272/>
- [22] ASTM D3518 / D3518M-18. *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate*. ASTM International, 2018.
- [23] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-807-2045-914.
- [24] BEATTIE, A.G. *Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques*. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2013.
- [25] KREIDL, M.; *Technická diagnostika*. 1.vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [26] ONO, K. *Nondestructive Testing*. University of California, Los Angeles: Department of Material Science and Engineering, 2005. 35 s. DOI: 10.1002/14356007.b01_11
- [27] WEWERS, M. Listening to the Sound of Materials: Acoustic Emission for the Analysis of Material Behaviour. *NDT&E International*. Elsevier Science, 1997, **30**(2), 99-106.
- [28] *Akustická emise*. Brno, Masarykova Univerzita, [online]. [cit. 2020-03-25] Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/projekty/kemis.html>.
- [29] ZAČAL, J., DOSTÁL, P., ŠUSTR, M., DOBROCKÝ, D. Acoustic Emission During Tensile Testing of Composite Materials. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2017, **65**(4), 1309-1315. DOI: 10.11118/actaun201765041309. ISSN 1211-8516.
- [30] *SENTRO Technologies: Advanced Inspection by Acoustic Emission On-Line or Off-Line*. 2016. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/SENTECHNOLOGIES/sentro-acoustic-emission-presentation-2016>
- [31] TRČKA, T. *Využití elektromagnetické a akustické emise pro diagnostiku moderních kompozitních materiálů*. Brno, 2014. Disertační práce. VUT v Brně.
-

- [32] STEIN, P. *Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém namáhání dílců*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [33] ALI, H. Q., TABRIZI, I. E., KHAN, R. M. A, TUFANI, A., YILDIZ, M. Microscopic analysis of failure in woven carbon fabric laminates coupled with digital image correlation and acoustic emission. *Composite Structures*. 2019, **230**. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111515. ISSN 02638223.
- [34] MI, Y., ZHU, CH., LI, X., WU, D. Acoustic emission study of effect of fiber weaving on properties of fiber-resin composite materials. *Composite Structures*. 2020, **237**. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111906. ISSN 02638223.
- [35] ZHAO, G., ZHANG, L., WANG, B., HAO, W., LUO, Y. HHT-based AE characteristics of 3D braiding composite shafts. *Polymer Testing*. 2019, **79**. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106019. ISSN 01429418.
- [36] SHAHRI, M.N., YOUSEFI J., FOTOUHI M., NAJFADABI M. A. Damage Evaluation of Composite Materials Using Acoustic Emission Features and Hilbert Transform. *Journal of Composite Materials*. 2016, **50**(14), 1897-1907. DOI: 10.1177/0021998315597555.
- [37] XU, D., LIU, P.F., CHEN, Z.P., LI, J.G., LENG, J.X., ZHU, R.H., JIAO, L., MU, J., LI, Y.Y., WANG, L. L. Delamination Analysis of Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates Under Different Loading Rates Using Acoustic Emission. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2019, **19**(4), 1034-1042. DOI: 10.1007/s11668-019-00691-1. ISSN 1547-7029.
- [38] SAIDANE, E. H., SCIDA, D., ASSARAR, M., AYAD, R. Damage mechanisms assessment of hybrid flax-glass fibre composites using acoustic emission. *Composite Structures*. 2017, **174**, 1-11. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.044. ISSN 02638223.
- [39] KONG, X., WANG, Y, YANG, Q., ZHANG, X., ZHANG, G., YANG, L., WU, Y., YANG, R. Damage identification in fiber reinforced titanium matrix composites using acoustic emission. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, 826. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.153928. ISSN 09258388. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838820302917>
- [40] HAO, X., ZHOU, H., MU, B. CHEN, L., GUO, Q., YI, X., SUN, L., WANG, Q., OU, R. Effects of fiber geometry and orientation distribution on the anisotropy of mechanical properties, creep behavior, and thermal expansion of natural fiber/HDPE composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020, **185**. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107778. ISSN 13598368.
- [41] MOŠOVÁ, V. *O matematice v mobilu* [online]. Matematický ústav AV ČR [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/144336/PokrokyMFA_60-2015-1_5.pdf
- [42] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno, 2011. Disertační práce. VUT v Brně.

- [43] HUANG, N.E., WU Z. A Review of Hilbert-Huang Transform: Method and its Application to Geophysical Studies. *Review of Geophysics*. 2008, **46**. DOI: 10.1029/2007RG000228.
- [44] VALTER, B. *Vlnková transformace*. Praha, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Karlova.
- [45] K-means Clustering. *Towards Data Science* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/k-means-clustering-algorithm-applications-evaluation-methods-and-drawbacks-aa03e644b48a>
- [46] TABRIZI, I. E., KEFAL, A., ZANJANI, J. S. M., AKALIN, C., YILDIZ, M. Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory. *Composite Structures*. 2019, **223**. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110971. ISSN 02638223.
- [47] GODIN, N., REYNAUD, P., FANTOZZI, F. Challenges and Limitations in the Identification of Acoustic Emission Signature of Damage Mechanisms in Composites Materials. *Applied Sciences*. 2018, **8**(8). DOI: 10.3390/app8081267. ISSN 2076-3417.
- [48] LE GUEN-GEFFROY, A., LE GAC, P. Y., DIAKHATE, M., HABERT, B., DAVIES, P., HÉNAFF, G. Long-term durability of CFRP under fatigue loading for marine applications. *MATEC Web of Conferences*. 2018, **165**. DOI: 10.1051/mateconf/201816507001. ISSN 2261-236X.
- [49] Fuzzy C-means Clustering. *MathWorks* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-c-means-clustering.html>
- [50] OSKOUEI, A. R., KHAMEDI, R., HEIDARY, H., FARAJPUR, M. *Acoustic emission data clustering for analyzing damage mechanisms in glass/polyester composites under mode I delamination*. 2012, 412-415. DOI: 10.1063/1.3703216.
- [51] LIU, C., BAI, R., LEI, Z., DI, J., WU, W., ZOU, J., GAO, T., YAN, C. Mode II fracture toughness related to ply angle for composite delamination analysis. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2020, 1-12. DOI: 10.1080/15376494.2020.1740955. ISSN 1537-6494.
- [52] GALOS, J. Thin-ply composite laminates: a review. *Composite Structures*. 2020, **236**. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111920. ISSN 02638223.
- [53] WU, Z., SHEN, Y., PAN, Z., HU, X. Three-point Bending Behavior and Energy Absorption Capacity of Composite Tube Reinforced by Gradient Braided Structure in Radial Direction. *Fibers and Polymers*. 2019, **20**(7), 1455-1466. DOI: 10.1007/s12221-019-1088-x. ISSN 1229-9197.
- [54] MICHAEL, J. S., SMITH, R., ROONEY, K. B. Determinants of kayak paddling performance. *Sports Biomechanics*. 2009, **8**(2), 167-179. DOI: 10.1080/14763140902745019. ISSN 1476-3141.

-
- [55] VAŠINA, J. *Teoretická příprava pro porovnání účinnosti vybraných typů kajakářských pádel při přímém záběru*. Praha, 2019. Bakalářská práce. Univerzita Karlova.
- [56] MORGOCH, D., TULLIS, S. Force analysis of a sprint canoe blade. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2011, **225**(4), 253-258. DOI: 10.1177/1754337111407793. ISSN 1754-3371.
- [57] BAKKER, J. Biomechanics of Paddling. In: *XXX International Symposium of Biomechanics in Sports*. Melbourne, 2012.
- [58] HARRISON, S. M., CLEARY, P. W., COHEN, R. C. Z. Dynamic simulation of flat water kayaking using a coupled biomechanical-smoothed particle hydrodynamics model. *Human Movement Science*. 2019, **64**, 252-273. DOI: 10.1016/j.humov.2019.02.003. ISSN 01679457.
- [59] EN ISO 16148:2006. *Lahve na přepravu plynů - Znovuplnitelné ocelové bezešvé lahve na plyny - Periodická kontrola metodou akustické emise*. 1. Český normalizační institut, 2006.